



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO E INSTALACIÓN DE LOS SERVICIOS
DE FUNCIONAMIENTO PARA LA
RECTIFICACIÓN DEL METANOL MEDIANTE
COLUMNA DE DESTILACIÓN EN EL PROCESO
DE BIODIESEL DE LA EMPRESA LA FABRIL
S.A. DE MANTA”**

TAPIA MOYANO CLAUDIO ANÍBAL

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2013

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

Abril, 02 de 2013

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

CLAUDIO ANÍBAL TAPIA MOYANO

Titulada:

**“DISEÑO E INSTALACIÓN DE LOS SERVICIOS DE FUNCIONAMIENTO
PARA LA RECTIFICACIÓN DEL METANOL MEDIANRE COLUMNA DE
DESTILACIÓN EN EL PROCESO DE BIODIESEL DE LA EMPRESA LA
FABRIL S.A. DE MANTA”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Geovanny Novillo A.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Rodolfo Santillán H.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Telmo Moreno R.
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: CLAUDIO ANÍBAL TAPIA MOYANO

TÍTULO DE LA TESIS: “DISEÑO E INSTALACIÓN DE LOS SERVICIOS DE FUNCIONAMIENTO PARA LA RECTIFICACIÓN DEL METANOL MEDIANRE COLUMNA DE DESTILACIÓN EN EL PROCESO DE BIODIESEL DE LA EMPRESA LA FABRIL S.A. DE MANTA”

Fecha de Examinación: 02 de Abril de 2013

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN | APRUEBA | NO APRUEBA | FIRMA |
|--|---------|---------------|-------|
| Ing. Marco Santillán (PRESIDENTE TRIB. DEFENSA) | | | |
| Ing. Rodolfo Santillán H. (DIRECTOR DE TESIS) | | | |
| Ing. Telmo Moreno R. (ASESOR) | | | |

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

f) Presidente del Tribunal

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos –científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

f) Claudio Aníbal Tapia Moyano

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad.

Y en especial para la empresa LA FABRIL S.A. de la ciudad de manta y todo el grupo de trabajo del departamento de Innovación entre los cuales puedo destacar al Ing. Alberto Zamorano y al Ing. Martín Inca, por brindarme la apertura para la ejecución de este proyecto, no puedo obviar al director de tesis Ing. Rodolfo Santillán H. y al asesor Ing. Telmo Moreno R., quienes han colaborado con sus conocimientos para la plena ejecución de esta investigación.

A todos los amigos, compañeros y personas que me apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa más de mi vida.

Claudio Tapia Moyano

DEDICATORIA

Este proyecto de investigación está dedicado a mis padres y toda mi familia, pilares fundamentales en mi vida. Sin ellos, jamás hubiese logrado conseguir lo que hasta ahora.

Claudio Tapia Moyano

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 22 |
| 1.1 Generalidades..... | 22 |
| 1.2 Situación del problema | 23 |
| 1.3 Antecedentes | 23 |
| 1.4 Justificación técnico-económica | 24 |
| 1.4.1 Justificación técnica | 24 |
| 1.4.2 Justificación económica..... | 25 |
| 1.5 Objetivos..... | 25 |
| 1.5.1 Objetivo general..... | 25 |
| 1.5.2 Objetivos específicos | 25 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 27 |
| 2.1 Biodiesel | 27 |
| 2.1.1 Definición | 27 |
| 2.1.2 Proceso de transesterificación..... | 27 |
| 2.2 Metanol | 29 |
| 2.2.1 Definición | 29 |
| 2.2.2 Precauciones | 29 |
| 2.3 Proceso de obtención del metanol en la industria..... | 29 |
| 2.4 Vapor de agua y sus aplicaciones | 30 |
| 2.4.1 Generación de vapor de agua..... | 30 |
| 2.4.2 Tipos de vapor | 31 |
| 2.4.3 Aplicaciones principales para el vapor de agua..... | 32 |
| 2.5 Generalidades sobre calderas | 36 |
| 2.5.1 Definición | 36 |
| 2.5.2 Clasificación de los generadores de vapor..... | 37 |
| 2.6 Sistema de distribución de vapor y purga de condensado | 38 |
| 2.6.1 Cabezales de vapor | 39 |
| 2.6.2 Tuberías principales de vapor | 40 |
| 2.6.3 Puntos de purga..... | 41 |
| 2.6.4 Válvulas reguladoras de presión | 45 |
| 2.6.5 Golpe de ariete y sus efectos..... | 48 |
| 2.6.6 Trampas para vapor y sus aplicaciones..... | 49 |
| 2.7 Bombas y sus aplicaciones | 56 |
| 2.7.1 Introducción | 56 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.7.2 | Principio y clasificación..... | 56 |
| 2.7.3 | Pérdidas primarias y secundarias en la tubería | 59 |
| 2.7.4 | Altura neta positiva en la aspiración (NPSH) | 59 |
| 2.7.5 | Cavitación | 60 |
| 2.7.6 | Bombas neumáticas | 61 |
| 2.8 | Sistemas de aire comprimido | 63 |
| 2.8.1 | Elementos básicos de una instalación de aire comprimido..... | 64 |
| 2.9 | Funcionamiento columna de destilación..... | 66 |
| 2.9.1 | Sistema de recuperación de metanol fénix | 67 |
| 3. | DISEÑO DE LOS SERVICIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA COLUMNA DE DESTILACIÓN..... | 70 |
| 3.1 | Parámetros para el diseño | 70 |
| 3.2 | Funcionamiento de la columna de destilación | 70 |
| 3.3 | Selección de las tuberías de transporte de metanol..... | 71 |
| 3.3.1 | Dimensionamiento de las bombas de alimentación de metanol | 72 |
| 3.3.2 | Características de la tubería seleccionada..... | 80 |
| 3.4 | Diseño de tuberías para transporte de vapor según la norma ASME B31.1 | 80 |
| 3.4.1 | Dimensionamiento de la tubería de vapor principal | 80 |
| 3.4.2 | Cálculo del espesor mínimo de pared | 82 |
| 3.4.3 | Diseño de las tuberías de vapor para los procesos de recalentamiento | 84 |
| 3.5 | Dimensionamiento del cabezal de distribución de vapor | 85 |
| 3.5.1 | Cálculo del diámetro del distribuidor | 86 |
| 3.5.2 | Cálculo de la longitud del distribuidor | 86 |
| 3.6 | Cálculo del espesor de aislante térmico para la tubería de vapor | 87 |
| 3.6.1 | Cálculo de los coeficientes de convección | 88 |
| 3.6.2 | Cálculo del espesor de aislante de la tubería principal de vapor | 92 |
| 3.6.3 | Cálculo del espesor de aislante para las tuberías de distribución de vapor | 95 |
| 3.7 | Dimensionamiento de la estación reguladora de presión..... | 96 |
| 3.7.1 | Selección de la válvula reguladora de presión..... | 96 |
| 3.8 | Dimensionamiento y selección de trampas de vapor para la tubería de vapor principal | 97 |
| 3.8.1 | Dimensionamiento de las piernas colectoras de condensado | 97 |
| 3.8.2 | Selección de las trampas de vapor para las piernas colectoras | 98 |
| 3.8.3 | Selección de trampas de vapor para el distribuidor | 100 |
| 3.9 | Cálculo de la carga de condensado para los equipos de consumo de vapor | 101 |
| 3.9.1 | Equipo de calentamiento_ Reboiler-101..... | 102 |
| 3.9.2 | Equipos de calentamiento_ Reboiler-201 y Reboiler-301 | 103 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.9.3 | Dimensionamiento de la tubería de retorno de condensado | 104 |
| 3.9.4 | Selección de trampas de vapor para los equipos de calentamiento | 106 |
| 3.9.5 | Cálculo del espesor de aislante para las tuberías de retorno de condensado. | 107 |
| 3.10 | Dimensionamiento de la tubería de aire comprimido | 109 |
| 3.10.1 | Cálculo del caudal necesario..... | 109 |
| 3.10.2 | Determinación de las pérdidas por tubería | 111 |
| 3.10.3 | Cálculo del diámetro interior del tubo | 111 |
| 3.11 | Captación del metanol destilado | 114 |
| 3.11.1 | Selección de bomba y tuberías para la conducción de agua desde la torre de enfriamiento | 114 |
| 3.11.2 | Capacidad de enfriamiento de la torre | 120 |
| 3.11.3 | Selección del tanque de acumulación y la bomba de retorno de condensado..... | 122 |
| 3.12 | Codificación de las tuberías | 123 |
| 4. | INSTALACIÓN DE LA COLUMNA DE DESTILACIÓN | 125 |
| 4.1 | Consideraciones para el montaje e instalación | 125 |
| 4.1.1 | Medición de concentración de gases. | 125 |
| 4.1.2 | Construcción de pantalla protectora | 126 |
| 4.1.3 | Construcción de base para columna..... | 126 |
| 4.1.4 | Adecuada selección de materiales y equipos | 127 |
| 4.1.5 | Construcción de la estructura metálica para columna | 128 |
| 4.2 | Instalación columnas C-101 y C-201..... | 128 |
| 4.3 | Instalación columna de destilación de metanol | 129 |
| 4.4 | Instalación de los servicios de funcionamiento de la columna de destilación | 130 |
| 4.5 | Evaluación de la columna de destilación de metanol | 131 |
| 4.5.1 | Prueba hidrostática en la columna de destilación y tuberías | 131 |
| 4.5.2 | Efectividad de destilación de la columna | 133 |
| 5. | ANÁLISIS FINANCIERO..... | 134 |
| 5.1 | Costos..... | 134 |
| 5.2 | Costos directos | 134 |
| 5.2.1 | Costos de materiales | 134 |
| 5.2.2 | Costos de instalación | 135 |
| 5.2.3 | Costos de construcción | 136 |
| 5.2.4 | Costos de equipos | 136 |
| 5.2.5 | Costos de transporte..... | 136 |
| 5.2.6 | Costo total directo..... | 136 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.3 | Costos indirectos | 137 |
| 5.4 | Costos totales | 137 |
| 5.5 | Depreciación | 137 |
| 5.5.1 | Cálculo de la depreciación | 138 |
| 5.6 | Determinación del gasto de energía..... | 140 |
| 5.6.1 | Energía eléctrica. | 141 |
| 5.6.2 | Vapor de agua | 142 |
| 5.6.3 | Gasto de energía totales | 143 |
| 5.7 | Cálculo del ingreso anual..... | 144 |
| 5.8 | Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN)..... | 144 |
| 5.8.1 | Cálculo del valor actual neto (VAN) | 145 |
| 5.8.2 | Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR)..... | 147 |
| 5.9 | Análisis beneficio/costo | 148 |
| 6. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 150 |
| 6.1 | Conclusiones | 150 |
| 6.2 | Recomendaciones | 152 |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
BIBLIOGRAFÍA
LINKOGRAFÍA
ANEXOS

LISTA DE TABLAS

| | | Pág. |
|----|--|------|
| 1 | Datos para dimensionar la bomba..... | 72 |
| 2 | Valores de velocidad calculados..... | 73 |
| 3 | Factor de fricción | 74 |
| 4 | Longitudes de tuberías | 74 |
| 5 | Accesorios instalados en la descarga | 75 |
| 6 | Factores de fricción..... | 76 |
| 7 | Pérdidas primarias y secundarias | 77 |
| 8 | Condiciones del sistema de bombeo | 77 |
| 9 | Variables para la selección | 78 |
| 10 | Características de la bomba seleccionada..... | 79 |
| 11 | Condiciones de trabajo sistema de bombeo TT2 | 79 |
| 12 | Composición química del acero 304L | 80 |
| 13 | Valores proporcionados para el dimensionamiento de la tubería de vapor | 81 |
| 14 | Características de la tubería seleccionada..... | 82 |
| 15 | Datos de las tuberías de distribución | 84 |
| 16 | Tabla de tuberías para los procesos | 84 |
| 17 | Espesores mínimos para las tuberías | 85 |
| 18 | Cálculo del área del distribuidor..... | 86 |
| 19 | Distancias del distribuidor de vapor | 87 |
| 20 | Propiedades del vapor a 190 °C..... | 89 |
| 21 | Datos para calcular el coeficiente de convección | 91 |
| 22 | Parámetros de operación de la tubería | 93 |
| 23 | Espesor del aislante para las tuberías de distribución de vapor | 96 |
| 24 | Datos para seleccionar válvula reguladora de presión..... | 96 |
| 25 | Dimensiones recomendadas para los pozos de goteo | 97 |
| 26 | Guía de selección para trampas de vapor..... | 99 |
| 27 | Datos del Reboiler-101 | 103 |
| 28 | Datos y cálculo de carga de condensado Reboiler-201 | 103 |
| 29 | Datos y cálculo de carga de condensado Reboiler-301 | 104 |
| 30 | Flujo de vapor flash | 105 |

| | | |
|----|---|-----|
| 31 | Valores para determinar el diámetro de tubería para el retorno de condensado..... | 106 |
| 32 | Diámetros de las tuberías para retorno de condensado | 106 |
| 33 | Carga de condensado para la selección de trampas de vapor | 107 |
| 34 | Trampas de vapor seleccionadas..... | 107 |
| 35 | Condiciones de funcionamiento tubería de condensado | 108 |
| 36 | Equipos que funcionan con aire comprimido | 110 |
| 37 | Longitud equivalente de accesorios en metros | 113 |
| 38 | Condiciones de funcionamiento para la bomba..... | 115 |
| 39 | Velocidades en las tuberías de succión y descarga..... | 115 |
| 40 | Factores de fricción..... | 116 |
| 41 | Longitudes de tubería..... | 116 |
| 42 | Accesorios en el sistema de bombeo | 117 |
| 43 | Alturas y presiones del sistema de bombeo | 118 |
| 44 | Condiciones de trabajo de la columna de destilación | 131 |
| 45 | Presiones adoptadas para las pruebas | 132 |
| 46 | Costo de materiales | 134 |
| 47 | Costos de instalación | 135 |
| 48 | Costos de construcción | 136 |
| 49 | Costos de equipos | 136 |
| 50 | Costos de transporte..... | 136 |
| 51 | Costo total directo..... | 137 |
| 52 | Costo total indirecto..... | 137 |
| 53 | Costos totales | 137 |
| 54 | Depreciación anual del equipo..... | 140 |
| 55 | Consumos de energía eléctrica | 142 |
| 56 | Gasto total en la destilación de metanol | 144 |
| 57 | Ingresos y egresos por año..... | 145 |
| 58 | Valores para la interpolación | 147 |

LISTA DE FIGURAS

| | | Pág. |
|----|--|------|
| 1 | Proceso de producción de biodiesel..... | 28 |
| 2 | Estados físicos del agua | 31 |
| 3 | Intercambiador de calor de coraza y tubos | 33 |
| 4 | Calentamiento con calor (vapor) Latente..... | 34 |
| 5 | Generador de turbina | 35 |
| 6 | Eyector para condensador de superficie | 36 |
| 7 | Caldera típica | 37 |
| 8 | Circuito de vapor típico | 39 |
| 9 | Distribuidor de vapor | 40 |
| 10 | Conexión de vapor tipo cuello de ganso | 41 |
| 11 | Ejemplo pozo de goteo | 42 |
| 12 | Pierna colectora..... | 43 |
| 13 | Sección típica de un separador..... | 43 |
| 14 | Sección transversal de un filtro..... | 44 |
| 15 | Válvula reductora de presión | 45 |
| 16 | Válvula reguladora con tuberías de entrada y salida | 46 |
| 17 | Longitud de tuberías mínimas recomendadas..... | 47 |
| 18 | Filtro con válvula de purga | 47 |
| 19 | Pierna colectora antes de las válvulas reguladoras | 48 |
| 20 | Formación de una bolsa “sólida” de agua..... | 49 |
| 21 | Funcionamiento Trampa de vapor termostática..... | 52 |
| 22 | Funcionamiento trampa de flotador & termostato (F&T) | 54 |
| 23 | Funcionamiento trampa de balde invertido | 55 |
| 24 | Funcionamiento trampa termodinámica | 56 |
| 25 | Diagrama de clasificación de bombas | 58 |
| 26 | Desgaste producido por la cavitación en un rodete de la bomba..... | 61 |
| 27 | Bomba neumática Wilden tipo P8 | 62 |
| 28 | Funcionamiento bomba neumática | 62 |
| 29 | Instalación de aire comprimido..... | 64 |
| 30 | Filtro con reguladora de presión | 66 |
| 31 | Recuperación de metanol 2 columnas | 68 |

| | | |
|----|---|-----|
| 32 | Recuperación de metanol 1 columna | 68 |
| 33 | Distribuidor de vapor | 87 |
| 34 | Configuración de la tubería..... | 88 |
| 35 | Configuración tubería de vapor | 92 |
| 36 | Cañuela de fibra de vidrio..... | 93 |
| 37 | Bomba por debajo de la succión | 114 |
| 38 | Tanque de recuperación de condensado | 122 |
| 39 | Instrumento (MSA Altair 5X) utilizado para la medición de gases | 125 |
| 40 | Construcción pantalla protectora | 126 |
| 41 | Construcción de la base para la columna de destilación..... | 127 |
| 42 | Estructura metálica | 128 |
| 43 | Instalación columnas pequeñas..... | 129 |
| 44 | Instalación columna de destilación | 129 |
| 45 | Antes y después de la instalación | 130 |
| 46 | Prueba de hermeticidad en la columna de destilación | 132 |
| 47 | Medidor de densidad portátil, DMA-35 | 133 |
| 48 | Distribución de los ingresos y egresos por año..... | 145 |
| 49 | Interés (%) vs. VAN (\$)..... | 147 |

LISTA DE ANEXOS

- A Cálculos
- B Tablas
- C Planos
- D Fotografías
- E Instalaciones proyectadas en AutoCAD

LISTA DE ABREVIACIONES

| | |
|------------|---|
| ASME | Sociedad americana de Ingenieros Mecánicos |
| ASME B31.1 | Código para tuberías de potencia |
| ASME B31.3 | Código par tuberías de proceso |
| TIR | Tasa interna de retorno |
| VAN | Valor actual neto |
| I.V.A. | Impuesto al valor agregado |
| NPT | Rosca nacional de tubos |
| ANSI | American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) |
| DIN | Deutsche Industrie Norm (Norma Industrial Alemana) |
| API | American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo) |
| SCH | Número de cédula de una tubería |

SÍMBOLOGÍA

| SÍMBOLO | DEFINICIÓN | UNIDADES |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| \dot{q} | Caudal del fluido | [m ³ /h] |
| V | Velocidad | [m/s] |
| A | Área | [m ²] |
| D _i | Diámetro interno | [mm] |
| Re | Número de Reynolds | - |
| | Densidad del fluido | [kg/m ³] |
| μ | Viscosidad dinámica del fluido | [Pa.s] |
| H _f | Pérdidas primarias de presión | [m] |
| L | Longitud | [m] |
| f | Factor de fricción | - |
| g | Aceleración de la gravedad | [m/s ²] |
| H _{rs} | Pérdidas secundarias de presión | [m] |
| k | Coefficiente de pérdidas secundarias | - |
| H _g | Altura estática | [m] |
| H _f | Suma total de pérdidas | [m] |
| h _d | Altura de descarga | [m] |
| h _s | Altura de succión | [m] |
| | Volumen específico | [ft ³ /lb] |
| t _{min} | Espesor mínimo de pared de tubo | [mm] |
| P | Presión | [lb/in ²] |
| S | Esfuerzo del material | [lb/in ²] |
| Y | Coefficiente de temperatura | - |

| | | |
|----------------|--|------------------------|
| E | Eficiencia por soldadura | - |
| t_{nom} | Espesor nominal de pared de tubo | [mm] |
| | Valor de pi | [3.1416] |
| h_{conv} | Coeficiente de convección | [W/m ² .°C] |
| Nu | Número de Nusselt | - |
| k_{fluido} | Conductividad térmica del fluido | [w/m.°C] |
| $h_{conv-amb}$ | Coeficiente de convección del ambiente | [W/m ² .°C] |
| Pr | Número de Prandlt | - |
| | Emisividad chapa de acero | - |
| | Coeficiente de Stefan-Boltzman | [W/m2.°K4] |
| T_s | Temperatura de la superficie | [°K] |
| T_a | Temperatura del ambiente | [°K] |
| A_0 | Área de transferencia externa del tubo | [m ²] |
| A_i | Área de transferencia interna del tubo | [m ²] |
| R_l | Resistencia térmica | [°C/W] |
| $e_{aislante}$ | Espesor del aislante | [mm] |
| r | Radio de la tubería | [mm] |
| CH | Carga de condensado | [lb/h] |
| U | Coeficiente global de transferencia de calor | [Btu/h.ft2.°F] |
| T_v | Temperatura de vapor | [°F] |
| T_f | Temperatura del fluido | [°F] |
| h_{fg} | Calor latente de evaporación | [Btu/lb] |
| h_f | Entalpía | [Btu/lb] |
| Q | Calor | [W] |
| \dot{Q} | Flujo de calor | [KJ/h] |

| | | |
|------------------|---|---------------------|
| \dot{V}_t | Caudal de aire comprimido | [m ³ /h] |
| P | Caída de presión | [psi] |
| bhp _i | Potencia para accionar la bomba | [KW] |
| r | Gravedad específica | - |
| | Eficiencia hidráulica | [%] |
| | Peso específico | [N/m ³] |
| P _v | Presión de vapor | [Pa] |
| c _p | Calor específico | [KJ/kg.°C] |
| T | Diferencia de temperaturas | [°C] |
| P _{TR} | Presión de prueba manométrica | [psig] |
| P _{TH} | Presión de prueba de hermeticidad | [psig] |
| S | Esfuerzo admisible | [psi] |
| TDH | Carga dinámica total | [psi] |
| NPSH | Altura neta positiva | [m] |
| TML | Diferencia de temperatura media logarítmica | [°F] |
| P/A | Coeficiente del valor presente serie uniforme | - |
| P/F | Coeficiente de valor presente pagos únicos | - |
| A/P | Coeficiente para la recuperación de capital | - |

RESUMEN

Esta investigación consiste en el Diseño e Instalación de los Servicios de Funcionamiento para la Rectificación del Metanol mediante Columna de Destilación en el proceso de Biodiesel de la Empresa LA FABRIL S.A. de Manta.

El objetivo del equipo es utilizar vapor de agua y destilar el metanol captado de la producción de biodiesel con una pureza del 94%; la manera de destilar el alcohol es calentarlo progresivamente hasta llegar a los 65°C, punto de evaporación, mediante el uso de Reboilers (recalentadores), separando el producto de sus contaminantes entre ellos biodiesel, glicerina y agua, cuyos puntos de evaporación son más elevados. Luego condensarlo mediante el uso de un intercambiador de calor de coraza y tubos enfriado por agua y obtener un producto con una pureza del 99.9%. Este alcohol con alta pureza es almacenado y posteriormente es utilizado nuevamente en la producción de biodiesel. La ventaja de usar metanol con alta pureza es obtener una reacción química más eficiente y biodiesel de mejor calidad.

El diseño de los servicios como tuberías de vapor bajo la norma ASME B31.1, estación reguladora de presión, tuberías de aire comprimido, cargas de condensado, tuberías de retorno de condensado, selección de trampas de vapor, aislamiento térmico, sistemas de bombeo y la instalación de cada uno de los equipos establecen una guía práctica a el estudiantado de Ingeniería.

Este tipo de proyecto es viable tanto ambiental, técnica como económicamente, y proporcionan el reciclaje del alcohol necesario para la producción de biodiesel; un biocombustible amigable con el ambiente.

ABSTRACT

This research consists on the Design and Installation of the Working Services for the Methanol Rectification by distillation column in the process of Biodiesel in LA FABRIL S.A. Company in Manta.

The team's goal is to use steam and distill the received methanol in the production of biodiesel with a purity of 94%; the way how to distill the alcohol is to heat gradually up to reach 65°C, evaporation point, evaporation rate, using Reboilers, by separating the product from their pollutants including biodiesel, glycerin and water, their evaporation rates are higher. Then condense using a heat exchanger sell and water – cooling tubes and obtain a product with a purity of 99.9%. This alcohol with a high purity is stores and then is used again in the production of biodiesel. The advantage of using high purity methanol is to obtain a more efficient chemical reaction and highest quality biodiesel.

The design services as steam pipes under the standard ASME B31.1, pressure regulated station, compressed air pipe, condensed charges, condensate return pipes, selection of steam traps, thermal isolation, pumping systems and the settled of each equipment establish a practical guide to the student of Mechanical Engineering.

This type of project is available both environmentally, technically and economically, and provide the necessary recycling of alcohol in order to produce biodiesel; an environmentally good biofuel.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Generalidades

La crisis energética, los problemas ambientales y el agotamiento de los recursos no renovables como el petróleo, el carbón y el gas natural originados por el desarrollo de la industria, han motivado la búsqueda de alternativas que provean fuentes de energía que sean técnica, económica y ambientalmente viables y sostenibles para ser empleados en los diferentes procesos tecnológicos.

El biodiesel es un combustible sustituto del gas-oil para motores diesel, el cual puede ser producido partiendo de materias primas agrícolas (aceites vegetales y/o grasas animales), aceites o grasas de fritura usados y metanol o etanol (estos también puede ser obtenidos a partir de productos agrícolas).

El biodiesel posee las mismas propiedades del combustible diesel empleado como combustible para automóviles, camiones, ómnibus y puede ser mezclado en cualquier proporción con el diesel obtenido de la refinación del petróleo.

El proceso empieza realizando una mezcla de metanol con hidróxido de sodio en un tanque agitado. Esta mezcla se adiciona al aceite de palma teniendo en cuenta que debe ir un 60% en exceso de metanol, en un tanque agitador.

La mezcla pasa a un reactor de columna, que posee las características de temperatura, presión y método de contacto ideales para que la reacción sea exitosa. Al final del reactor se debe haber desarrollado la reacción en un 90%. Desde el reactor se está produciendo constantemente glicerol e igualmente se irá sedimentando, así que posterior a este se dispone de un sedimentador diseñado para extraer el glicerol producido. La fase ligera es pasada a un nuevo reactor, esta vez como tanque agitado donde se llega a una transesterificación del 97%. Seguidamente se procede a un proceso

de lavado con agua a una temperatura de 80°C; esta se lleva la mayor parte del glicerol suspendido así como una buena parte del metanol y una pequeña parte de aceite. Antes de llegar al tercer reactor, la solución se mezcla nuevamente con un flujo de metanol e hidróxido de sodio utilizando una relación de tres veces la inicial y una proporción de metanol del 30% en exceso. Hay entonces una secuencia similar a la anteriormente descrita.

Después del segundo lavado la fase ligera es despojada casi completamente del metanol en un tanque de separación. El biodiesel finalmente se enfría y filtra.

1.2 Situación del problema

En la producción de biodiesel se hace indispensable la utilización del metanol para poder llevar a cabo la reacción necesaria para la obtención del producto. Luego de varios procesos se realiza la extracción del metanol en forma de gas, para condensarlo y almacenarlo en recipientes apropiados para ser trasladados a una empresa privada para su debida purificación.

Los altos costos de purificación, transporte y además el déficit del producto en el mercado, son factores predominantes para tomar la decisión de instalar una columna de destilación de metanol, obteniéndose el abastecimiento necesario del producto y alta pureza con un 99.9%.

1.3 Antecedentes

El agotamiento de los recursos no renovables y la necesidad de obtener combustibles amigables para el medio ambiente como es el caso del biodiesel, combustible obtenido a partir de aceite vegetal hacen de la empresa LA FABRIL SA, fábrica pionera en la elaboración de biocombustible.

La elaboración de biocombustible requiere el uso de varios compuestos químicos pero entre los más costosos y escasos está el alcohol denominado metanol.

El metanol utilizado para la elaboración del biocombustible debe tener una alta pureza, pero su dificultad de adquisición con dichas características ha provocado la suspensión, por varias semanas, de las actividades normales de funcionamiento de la planta de producción de biodiesel, hasta obtener el nuevo abastecimiento, con lo cual se han generado pérdidas económicas para la empresa. A la problemática mencionada anteriormente se suma la poca o nula capacidad de purificación (dentro de la empresa La Fabril) del metanol recuperado del proceso, ya que este compuesto se lo envía a otra empresa prevista de todos los equipos necesarios para dicha purificación.

En vista a estos problemas se vio la necesidad de instalar una columna de destilación de metanol dentro de la planta, para obtener así el compuesto tan necesario y con las condiciones óptimas.

1.4 Justificación técnico-económica

1.4.1 *Justificación técnica* . El propósito de la captura del metanol a través de la evaporación es ayudar en el lavado del biodiesel y lidiar con el producto secundario que es el glicerol.

Dentro del proceso de biodiesel los servicios como: alimentación de vapor, descarga de condensados, recirculación de agua enfriada por torre, sistema de tuberías para transporte de metanol, diseño de tuberías de vapor, aislantes térmicos para evitar condensación, descargas de mermas, selección de bombas; juegan un papel importante por lo que requieren un diseño e instalación adecuados para el funcionamiento de los subprocesos, éste es el caso de la rectificación de metanol a través de la columna de destilación.

La participación en la implementación y pruebas del sistema de recuperación y rectificación de metanol, liderada por La Fabril, empresa pionera en el país en la producción de biodiesel brinda la oportunidad a un futuro profesional de Ingeniería

Mecánica poder aplicar los conocimientos adquiridos en el transcurso de su formación académica.

1.4.2 *Justificación económica.* La separación y captura del metanol permite ahorrar dinero al hacer posible el reciclaje del agente más caro en la producción del biodiesel.

Como el aceite de palma requiere grandes cantidades de metanol para su procesamiento, la empresa cuenta con un sistema para el condensado de metanol y está recuperando aproximadamente el 95% del metanol utilizado, pero dicho compuesto está contaminado con varios elementos entre ellos agua; es decir que posee una pureza aproximada entre el 85 - 90 %, para su reutilización la empresa envía a procesar y rectificar el metanol en una agencia privada, significándole elevados costos para la obtención de la materia necesaria para la producción de biodiesel.

Con estos antecedentes se vio la necesidad de implementar un sistema de rectificación del metanol mediante destilación, para obtener un 99.9% de pureza.

La recuperación del metanol puede representar la diferencia entre tener una ganancia o cubrir los gastos de producción, representando así un gran beneficio para la empresa.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo general.* Diseñar e instalar los servicios de funcionamiento para la rectificación del metanol mediante columna de destilación en el proceso de biodiesel de la empresa La Fabril S.A. de Manta.

1.5.2 Objetivos específicos

Diseñar e instalar los sistemas de servicios para el funcionamiento de la columna de destilación en la rectificación del metanol.

Diseñar e instalar un sistema de conducción de metanol hacia el sistema de rectificación.

Diseñar e instalar un sistema de conducción de vapor de agua con su estación reguladora.

Instalar la columna de destilación para la rectificación del metanol.

Evaluar la capacidad de destilación de la columna instalada.

Realizar un análisis beneficio/costo del proyecto.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Biodiesel

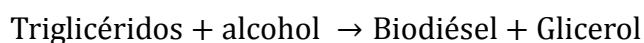
2.1.1 *Definición.* El biodiesel es un combustible de naturaleza renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales y que puede ser utilizado como sustituto o complemento del diesel.

La obtención de este combustible se hace a través de un proceso químico llamado transesterificación. En este proceso los aceites orgánicos son combinados con un alcohol y alterados químicamente para formar éster etílico o metílico, el cual toma el nombre de biodiesel. [1]

2.1.2 *Proceso de transesterificación* [10] [11] [12]. El principal motivo por el cual los aceites vegetales no se pueden utilizar directamente en los motores diesel, es por su viscosidad.

Para la reducción de la viscosidad el proceso químico recomendado es el de la transesterificación.

La transesterificación es un proceso químico en el cual usando alcohol en presencia de un catalizador, se rompe químicamente la molécula del triglicérido, reemplazando los glicéridos del aceite por el alcohol, formando un éster graso y obteniendo glicerol como subproducto.



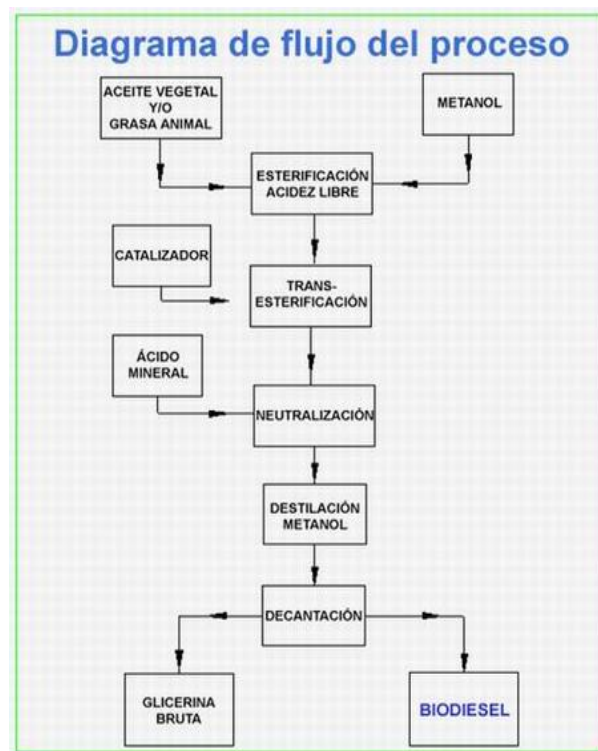
Las moléculas lineales del éster resultante reciben el nombre de biodiesel y están formadas por el éster del ácido graso y el alcohol.

Estas moléculas tienen menor viscosidad, menor masa molecular, menor intervalo de ebullición y menor punto de inflamación que el triglicérido original. Algo adicional es

que el biodiesel tiene propiedades físicas y químicas muy similares a las del diesel derivado del petróleo.

Los catalizadores que suelen usarse para el proceso de transesterificación son el hidróxido de sodio (NaOH) conocido como soda cáustica y el hidróxido de potasio (KOH) llamado también potasa cáustica o lejía.

Figura 1. Proceso de producción de biodiesel



Fuente: Ref. [11]

Esta mezcla es recuperada y separada en fases para aislar el glicerol, subproducto utilizado en la industria. El biodiesel es extraído y el alcohol reciclado.

2.2 Metanol

2.2.1 *Definición.* El compuesto químico metanol, también conocido como alcohol metílico o alcohol de madera, es el alcohol más sencillo. A temperatura ambiente se presenta como un líquido ligero (de baja densidad), incoloro, inflamable y tóxico que se emplea como anticongelante, disolvente y combustible.

Su fórmula química es CH_3H (CH_4O). [13]

2.2.2 *Precauciones.* En concentraciones elevadas el metanol puede causar dolor de cabeza, mareo náuseas, vómitos y muerte (la ingestión de 20ml a 50ml se trata de una dosis mortal). Una exposición aguda puede causar ceguera o pérdida de la visión, ya que puede dañar seriamente el nervio óptico. Una exposición crónica puede ser causa de daños al hígado o de cirrosis. El metanol, a pesar de su toxicidad, es muy importante en la fabricación de medicinas. [14][15]

2.3 Proceso de obtención del metanol en la industria

Originariamente se producía metanol por destilación destructiva de astillas de madera. Esta materia prima condujo a su nombre de alcohol de madera. Este proceso consiste en destilar la madera en ausencia de aire a unos 400 °C formándose gases combustibles (CO , C_2H_4 , H_2), empleados en el calentamiento de las retortas; un destilado acuoso que se conoce como ácido piroleñoso y que contiene un 7-9% de ácido acético, 2-3% de metanol y un 0.5% de acetona; un alquitrán de madera, base para la preparación de antisépticos y desinfectantes; y carbón vegetal que queda como residuo en las retortas. Actualmente, todo el metanol producido mundialmente se sintetiza mediante un proceso catalítico a partir de monóxido de carbono e hidrógeno.

Esta reacción emplea altas temperaturas y presiones, y necesita reactores industriales grandes y complicados.

El metanol en estado gaseoso que abandona el reactor debe ser purificado. Para ello primeramente pasa por un intercambiador de calor que reduce su temperatura, condensándose el metanol. Este se separa luego por medio de separador, del cual salen gases que se condicionan (temperatura y presión adecuadas) y se recirculan. El metanol en estado líquido que sale del separador alimenta una columna de destilación alimentada con vapor de agua a baja presión. De la torre de destilación sale el metanol en condiciones normalizadas. [16][17]

2.4 Vapor de agua y sus aplicaciones

El vapor se refiere a la materia en estado gaseoso. Aunque este no se limita al vapor generado por agua, muchos diferentes tipos de vapor existen en el mundo. Sin embargo, al término “vapor” es más comúnmente usado para referirse al estado gaseoso del agua. [18]

2.4.1 Generación de vapor de agua. Cuando al agua se le comunica energía calorífica, varía su entalpía y su estado físico.

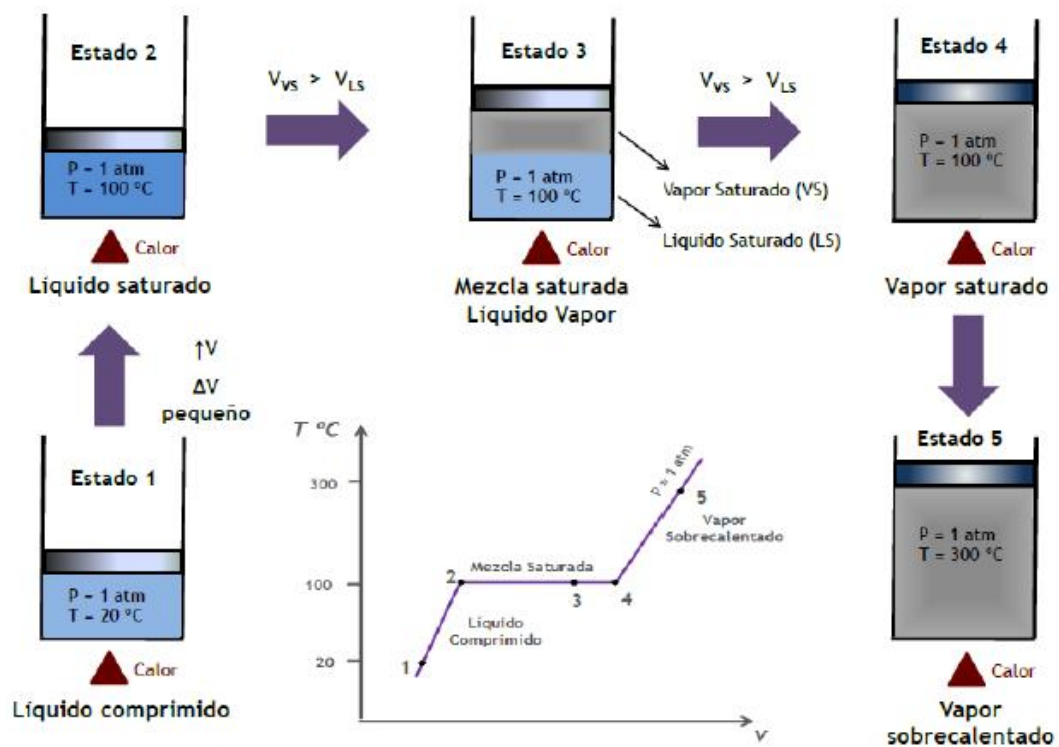
A medida que tiene lugar el calentamiento, la temperatura del fluido aumenta y por lo regular su densidad disminuye. La rapidez de la vaporización depende de la velocidad con la cual se transmite el calor al agua y de su movimiento en el recipiente en donde está confinado. El vapor así formado, si bien se halla en el estado gaseoso, no sigue enteramente las leyes de los gases perfectos. La temperatura a la cual se produce la ebullición depende de la pureza del agua y de la presión absoluta ejercida sobre ella. Para el agua pura la temperatura de ebullición tiene un valor determinado para cada presión y es menor a bajas presiones. [19]

2.4.2 *Tipos de vapor.* Si el agua es calentada sobre su punto de ebullición, esta se convierte en vapor, o agua en estado gaseoso.

De acuerdo a los principios de la termodinámica el estado físico, contenido energético y las propiedades físico-químicas del agua cambian al añadirle calor desde cualquier fuente energética.

Sin embargo, no todo el vapor es el mismo. Las propiedades del vapor varían de gran forma dependiendo de la presión y la temperatura la cual está sujeta. [20]

Figura 2. Estados físicos del agua



Fuente: Ref. [20]

2.4.2.1 *Vapor saturado.* El vapor saturado es el vapor producido a la temperatura de ebullición correspondiente a la presión absoluta.

2.4.2.2 *Vapor saturado húmedo*. Se considera vapor saturado húmedo al vapor que contiene partículas de agua en fase líquida contenidas en el vapor.

Estas pequeñas partículas se forman por condiciones establecidas de presión y temperatura o por pérdidas energéticas en el transporte.

La calidad del vapor se define como la razón que existe entre la masa del vapor y la masa del líquido que ocupa un espacio determinado. [20]

2.4.2.3 *Vapor saturado seco*. Cuando al vapor saturado se le adiciona vapor, pierde aquellas partículas en fase líquida que caracteriza el vapor saturado húmedo para transformarse en vapor saturado seco por medio del incremento de temperatura sobre la temperatura de saturación.

2.4.2.4 *Vapor Flash*. El vapor flash se produce cuando se tiene líquido presurizado en condiciones de saturación, cuando la presión cae súbitamente, su volumen presenta una mezcla saturada a baja presión por lo que parte de este volumen se evapora y el resto se transforma en condensado. [20]

2.4.3 *Aplicaciones principales para el vapor de agua*. El vapor es usado en un gran rango de industrias.

Las aplicaciones más comunes para el vapor son, por ejemplo, procesos calentados por vapor en fábricas y plantas, y turbinas impulsadas por vapor en plantas eléctricas, pero el uso del vapor en la industria se extiende más allá de las antes mencionadas.

Algunas de las aplicaciones típicas del vapor para las industrias son:

Esterilización/Calentamiento

Impulso/Movimiento

Motriz

Atomización

Limpieza

Hidratación

Humidificación

A continuación detallaremos algunas de las aplicaciones del vapor de agua. [21]

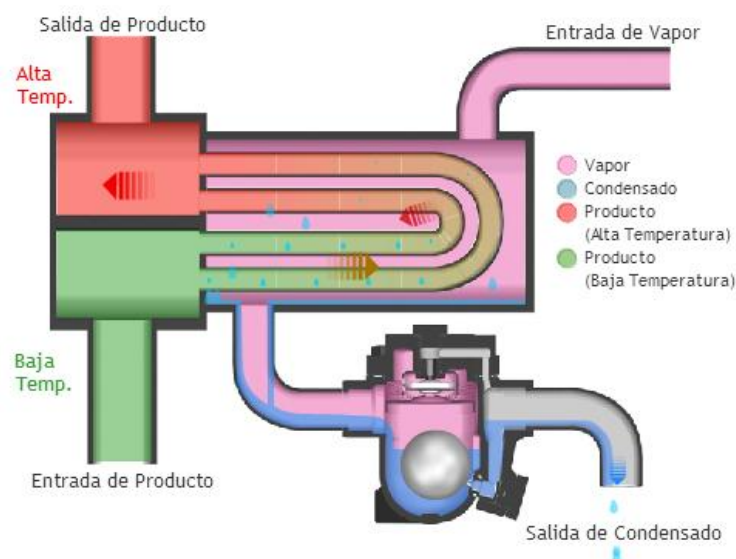
2.4.3.1 Vapor para calentamiento [21]

2.4.3.1.1 Vapor de presión positiva. El vapor generalmente es producido y distribuido en una presión positiva.

En la mayoría de los casos, esto significa que es suministrado a los equipos en presiones mayores a 0 MPag (0 psig) y a temperaturas mayores de 100°C (212°F).

Las aplicaciones de calentamiento para vapor a presión positiva se pueden encontrar en plantas procesadoras de alimentos, plantas químicas, y refinerías solo por nombrar algunas. El vapor saturado es utilizado como la fuente de calentamiento para fluido de proceso en intercambiadores de calor, reactores, reboilers, pre calentadores de aire de combustión, y otros tipos de equipos de transferencia de calor.

Figura 3. Intercambiador de calor de coraza y tubos



Fuente: Ref. [21]

2.4.3.1.2 *Vapor al vacío.* El uso de vapor para el calentamiento a temperaturas por debajo de 100°C (212°F), tradicionalmente el rango de temperatura en el cual se utiliza agua caliente, ha crecido rápidamente en los últimos años.

Cuando vapor saturado al vacío es utilizado en la misma forma que el vapor saturado a presión positiva, la temperatura del vapor puede ser cambiada rápidamente con solo ajustar la presión, haciendo posible el controlar la temperatura de manera más precisa que las aplicaciones que usan agua caliente. Sin embargo, en conjunto con el equipo se debe utilizar una bomba de vacío, debido a que el solo reducir la presión no lo hará por debajo de la presión atmosférica.

Figura 4. Calentamiento con calor (vapor) Latente



Fuente: Ref. [21]

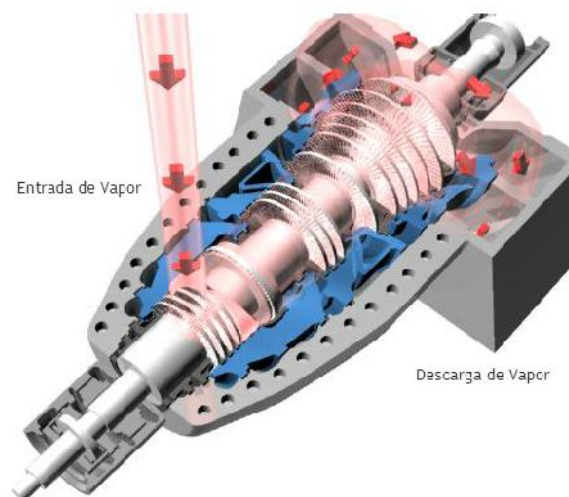
2.4.3.2 *Vapor para impulso/movimiento* [21]. El vapor se usa regularmente para propulsión (así como fuerza motriz) en aplicaciones tales como turbinas de vapor.

La turbina de vapor es un equipo esencial para la generación de electricidad en plantas termoeléctricas. En un esfuerzo por mejorar la eficiencia, se han realizado progresos orientados al uso del vapor a presiones y temperaturas aún mayores. Existen algunas plantas termoeléctricas que utilizan vapor sobrecalentado a 25 MPa abs (3625 psia), 610°C (1130°F), presión supercrítica en sus turbinas.

Generalmente el vapor sobrecalentado se usa en las turbinas de vapor para prevenir daños al equipo causados por la entrada de condensado. Sin embargo, en ciertos tipos de plantas nucleares, el uso de vapor a alta temperatura se debe de evitar, ya que podría ocasionar daños al material usado en las turbinas. Se utiliza en su lugar vapor saturado a alta presión. En donde se usa vapor saturado, generalmente se instalan separadores en la línea de suministro de vapor para remover el condensado del flujo de vapor.

Además de la generación de energía, otras aplicaciones típicas de impulso/movimiento son los compresores movidos por turbinas o las bombas, compresor de gas, bombas para las torres de enfriamiento, etc.

Figura 5. Generador de turbina



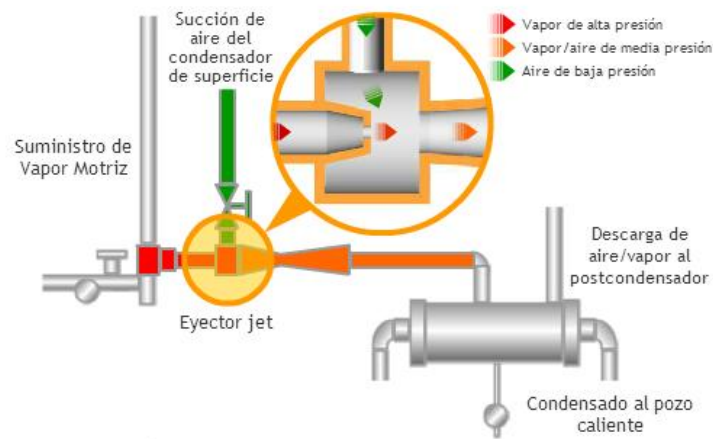
Fuente: Ref. [21]

2.4.3.3 *Vapor como fluido motriz* [21]. El vapor puede ser usado de igual manera como una fuerza "motriz" para mover flujos de líquido o gas en una tubería.

Los eyectores de vapor son usados para crear el vacío en equipos de proceso tales como las torres de destilación que son utilizadas para purificar y separar flujos de procesos. Los eyectores también pueden ser utilizados para la remoción continua del aire de los

condensadores de superficie, esto para mantener una presión de vacío deseada en las turbinas de condensación (vacío).

Figura 6. Eyector para condensador de superficie



Fuente: Ref. [21]

2.5 Generalidades sobre calderas

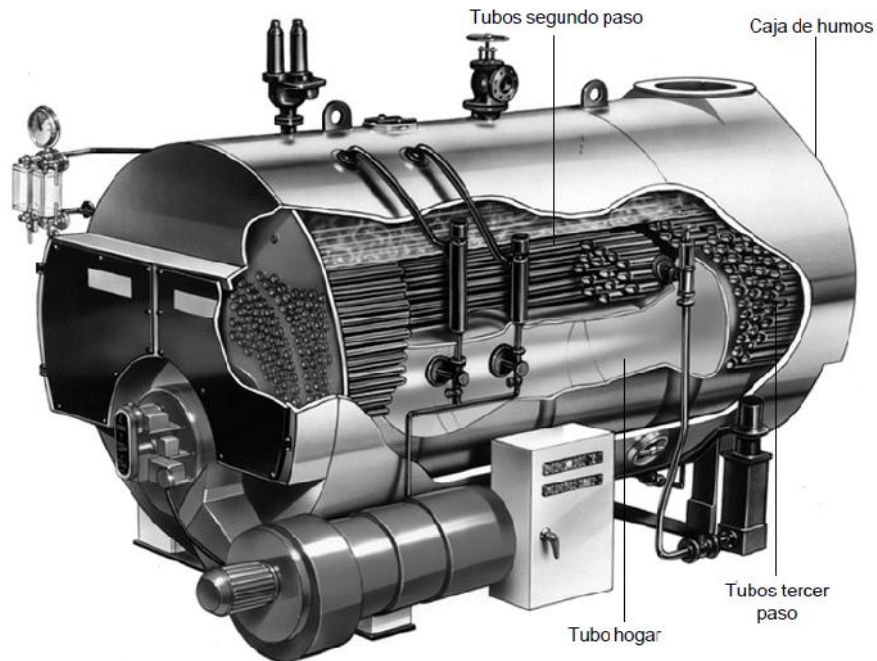
2.5.1 Definición. La caldera es una máquina o dispositivo de ingeniería diseñado para generar vapor.

Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia su fase.

La caldera es todo aparato de presión donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.

La caldera es un caso particular en el que se eleva a altas temperaturas de intercambiadores de calor, en la cual se produce un cambio de fase. Además, es recipiente de presión, por lo cual es construida en parte con acero laminado a semejanza de muchos contenedores de gas. [22]

Figura 7. Caldera típica



Fuente: Ref. [22]

2.5.2 Clasificación de los generadores de vapor [22]

2.5.2.1 *Por la disposición de los fluidos.* En general las calderas en su configuración interna presentan tuberías para el transporte de los fluidos y un lugar en donde se produce la combustión o generación de calor.

2.5.2.1.1 *Calderas Acuotubulares.* En este tipo de calderas, el calor es transferido desde el hogar de la caldera y desde los gases de escape que circulan por el interior de los tubos dispuestos en la caldera.

La transferencia de calor se da del interior de los tubos hacia el fluido que circunda los tubos y el hogar, este tipo de calderas manejan presiones de 0 a 300 psig.

2.5.2.1.2 *Calderas Pirotubulares.* En este tipo de calderas, el agua circula por el interior de los tubos y la transferencia de calor se da desde la superficie externa de los tubos hacia el interior de ellos donde se encuentra el agua.

Este tipo de calderas manejan presiones de 0 a 2200 psig.

2.5.2.2 *Por su configuración.* Pueden ser horizontales o verticales

2.5.2.3 *Por el mecanismo de transmisión de calor dominante.* Puede ser por convección, radiación, convección y radiación

2.5.2.4 *Por el tiro*

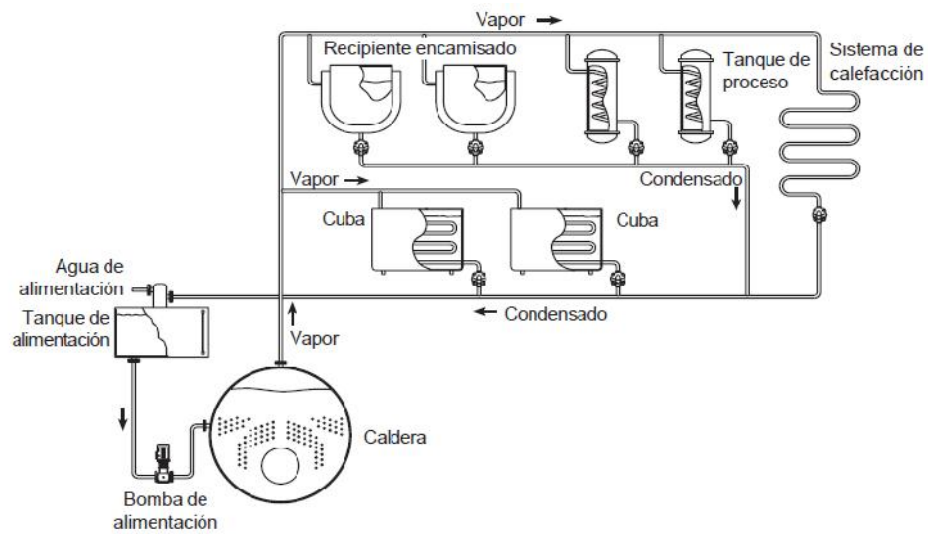
- De tiro natural
- De hogar presurizado
- De hogar equilibrado

2.6 Sistema de distribución de vapor y purga de condensado

El sistema de distribución de vapor es un enlace importante entre la fuente generadora de vapor y el usuario. La fuente generadora de vapor puede ser una caldera o una planta de cogeneración.

Los sistemas de distribución de vapor están conformados por tres componentes principales que son cabezales o distribuidores, tuberías principales y los ramales los mismos que están encargados de transportar el vapor desde los generadores a diversos equipos de consumo. El sistema debe garantizar de manera eficiente la entrega y la calidad del vapor requerido, tomando en cuenta parámetros importantes como demanda, presión y temperatura que son controlados por los diversos accesorios instalados en el sistema. [23]

Figura 8. Circuito de vapor típico



Fuente: Ref. [23]

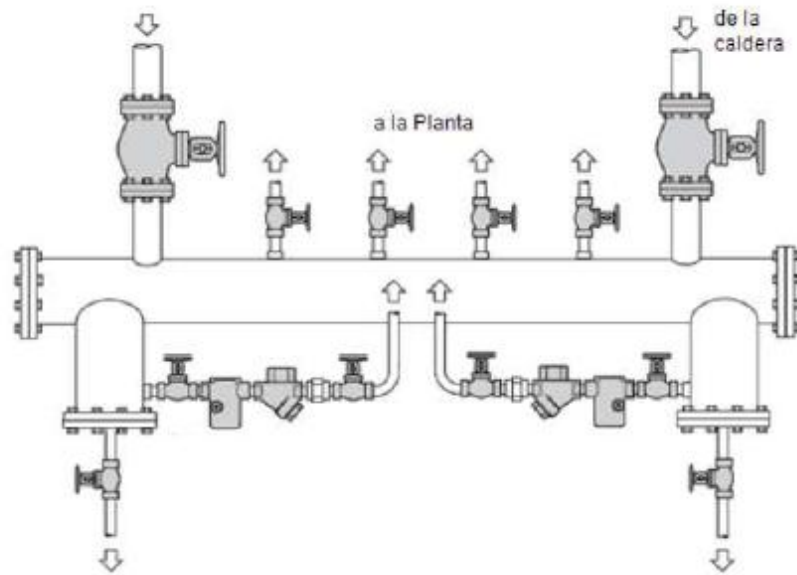
2.6.1 *Cabezales de vapor.* Un cabezal de vapor denominado así en diferentes plantas industriales.

No es otra cosa sino una tubería madre de distribución de vapor que puede recibir vapor de una o varias calderas al mismo tiempo.

Lo más común es que sea una tubería horizontal a la que se le alimenta el vapor y al mismo tiempo se alimenten las tuberías principales de distribución.

Es importante trampear el cabezal de forma correcta para asegurarse que cualquier sustancia indeseable (agua de la caldera y/o partículas) sea removida del vapor antes de su distribución. [24]

Figura 9. Distribuidor de vapor



Fuente: Ref. [24]

2.6.2 Tuberías principales de vapor. La red de distribución de vapor junto con las reguladoras de presión y temperatura, constituye la parte central de una instalación para la generación de vapor.

Es la encargada precisamente de conducir el vapor generado en la caldera hacia los diferentes puntos de demanda existentes en el proceso industrial. [24]

2.6.2.1 Ramales de vapor. Los ramales son las tuberías que salen de las tuberías principales de vapor y llevan el vapor hacia el equipo que lo utiliza.

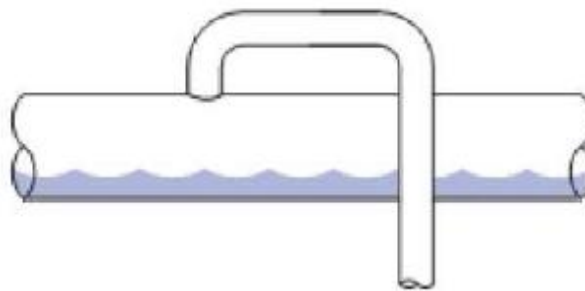
El sistema completo debe ser diseñado y conectado de forma que se evite la acumulación de condensado en cualquier punto del sistema.

Cuando una válvula se abre el vapor inmediatamente se transporta y se produce un intercambio de energía de este a la tubería que se encuentra a la temperatura ambiente, el condensado se forma inmediatamente a lo que se conoce como régimen de condensado de carga inicial. Una vez que la tubería se calienta, la creación de

condensado disminuye drásticamente aún cuando se siga transfiriendo calor hacia los alrededores de la tubería, a este régimen se lo conoce como carga en régimen.

Como el condensado se encuentra en las tuberías compartiendo el espacio junto al vapor, los ramales que salgan de las tuberías estarán ubicados en la parte superior de la tubería manteniendo una configuración particular llamada cuello de ganso, esta configuración permite extraer el vapor sin carga de condensado. [24]

Figura 10. Conexión de vapor tipo cuello de ganso



Fuente: Ref. [24]

Debido a la presencia de condensados en la tubería de transporte, es necesario drenarlo por lo que se utiliza dispositivos detallados a continuación.

2.6.3 Puntos de purga. Las ventajas de elegir el tipo de purgador más apropiado para una determinada aplicación será en vano si el condensado no puede encontrar fácilmente el camino hacia el purgador.

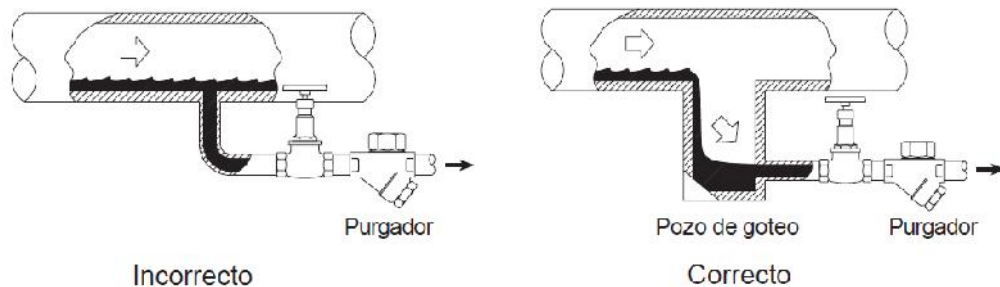
Por esta razón debe considerarse cuidadosamente el tamaño y la situación de purga.

Debe considerarse también que le ocurre al condensado en una tubería de vapor cuando se produce una parada y todo el flujo cesa. Este circulará en la dirección descendente de la tubería por efecto de la fuerza de gravedad, y se acumulará en los puntos bajos del sistema. Los purgadores deberán, por lo tanto, montarse en esos puntos bajos.

En la figura se muestra una solución fiable para evacuar el condensado. Se monta una conexión "T" (el mismo diámetro hasta 150 mm, y un diámetro inmediatamente inferior

en tamaños superiores) en la tubería que actúa como un pozo de goteo. Todo el condensado caerá al pozo y recorrerá el camino por la tubería hasta el purgador. [24]

Figura 11. Ejemplo pozo de goteo



Fuente: Ref. [24]

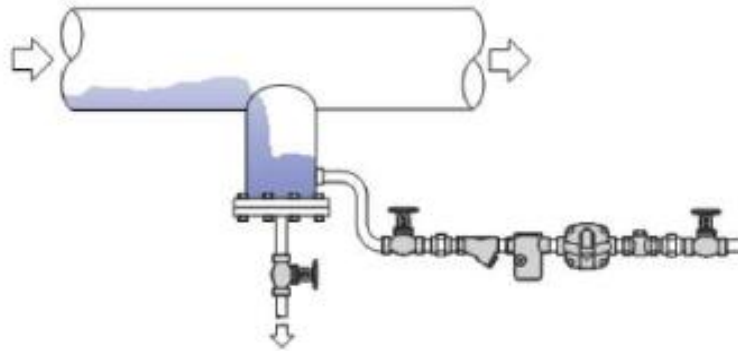
2.6.3.1 *Piernas colectoras*. Las piernas colectoras son utilizadas para remover el condensado atrapado en las líneas principales y distribución de vapor.

Para así garantizar una alta calidad de vapor y utilizarlo en varias aplicaciones de la planta, al mismo tiempo que previenen un peligroso y dañino golpe de ariete.¹

Como el vapor viaja a alta velocidad a través de la tubería, el condensado que se forma producto de las pérdidas de calor en las tuberías y/o un inadecuado control de la caldera da como resultado el arrastre de condensado. Por lo tanto, las piernas colectoras se colocan en puntos donde el condensado se pueda acumular para permitir una adecuada descarga del sistema. Ya que el condensado se drena por gravedad, las piernas de condensado se deben ubicar en el fondo de la tubería y diseñadas con diámetros suficientemente grandes como para promover la recolección. [24]

¹ El golpe de ariete o pulso de Zhukowski, llamado así por el ingeniero ruso Nikolái Zhukovski, es junto a la [cavitación](#), el principal causante de averías en [tuberías e instalaciones hidráulicas](#).

Figura 12. Pierna colectora



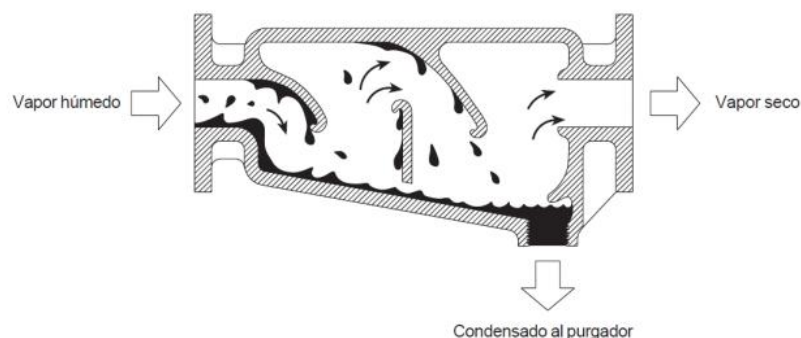
Fuente: Ref. [24]

2.6.3.2 *Separadores de vapor.* Los separadores se utilizan con frecuencia en equipos que requieran que el vapor presente una cantidad mínima de humedad.

Por lo general este dispositivo se emplea en esterilización de equipos quirúrgicos, cocción controlada de alimentos, etc.

El vapor al ingresar al separador se encuentra con unas placas que cumplen la función de separar la parte del vapor con alto nivel energético de la parte que ha perdido energía en el trayecto, disminuyendo la velocidad de las gotas de condensado el mismo que será purgado por la parte inferior del separador y dirigido a una pierna colectora para posteriormente ser parte del retorno de fluido a los equipos de generación. [24]

Figura 13. Sección típica de un separador



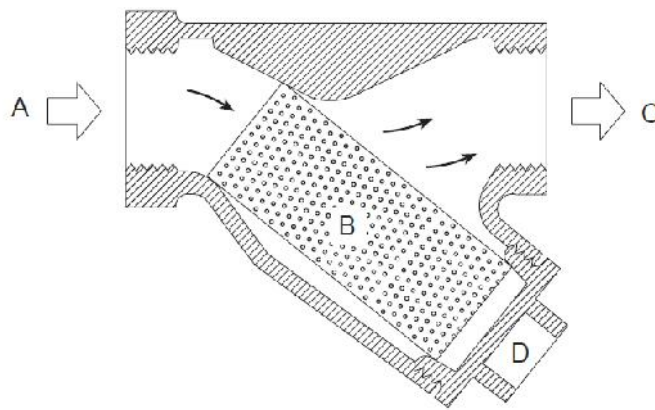
Fuente: Ref. [24]

2.6.3.3 *Filtros*. Cuando se instala una tubería nueva, no es raro que se queden fragmentos de arena de fundición, del embalaje, del ensamblado, virutas, varillas de soldar, e incluso tornillos o tuercas que hayan quedado dentro.

En el caso de las tuberías viejas habrá oxido y en zonas de aguas duras, depósitos de carbonatos.

Por lo tanto, es sensato montar un simple filtro en la tubería delante de cada purgador, aparato de medida, válvula reductora y válvula de control. [24]

Figura 14. Sección transversal de un filtro



Fuente: Ref. [24]

El vapor fluye desde la entrada “A”, a través del tamiz perforado “B” hacia la salida “C”. Mientras que el vapor y el agua pasarán con facilidad a través del tamiz, la suciedad quedará retenida. Se puede quitar el tapón “D”, para retirar el tamiz y limpiarlo regularmente.

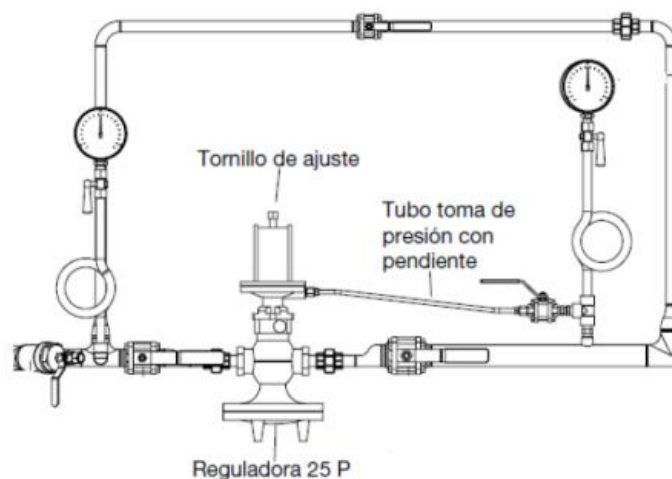
Los filtros sin embargo pueden ser una fuente de problemas de golpe de ariete, para evitar esto, cuando forma parte de una línea de vapor, los filtros deben montarse con la cesta en posición horizontal. [24]

2.6.4 *Válvulas reguladoras de presión.* Debido a que ciertos equipos requieren presiones determinadas de trabajo de acuerdo al diseño de los mismos, se debe reducir la presión del vapor antes que ingrese al equipo, para lo cual se utiliza válvulas reguladoras de presión que pueden ser de acción directa externa o internamente.

El propósito de la válvula reguladora es reducir la presión de entrada del sistema a una presión de salida constante.

Cuando se presenta una reducción de vapor, su volumen aumenta por lo tanto su volumen específico, lo que hace imprescindible el aumento del diámetro a la salida de la válvula. [24]

Figura 15. Válvula reductora de presión



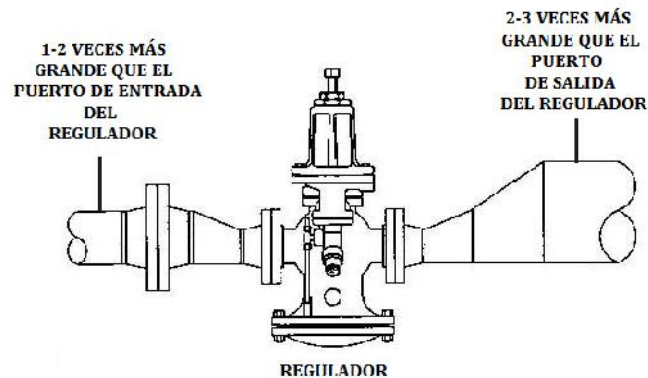
Fuente: Ref. [24]

2.6.4.1 *Aplicación de una válvula reguladora y notas de instalación* [24]. Las siguientes son consideraciones para todas las instalaciones de reguladoras de vapor, el funcionamiento depende del diseño, instalación, el arranque y los procedimientos de mantenimiento.

2.6.4.1.1 *Dimensionamiento de tuberías de entrada y salida.* El inadecuado dimensionamiento de la tubería puede contribuir a un control errático y ruido excesivo en un sistema de vapor.

Asegurarse que la conexión de entrada y de salida de la tubería sea adecuadamente dimensionada para el flujo, velocidad y presiones requeridas.

Figura 16. Válvula reguladora con tuberías de entrada y salida

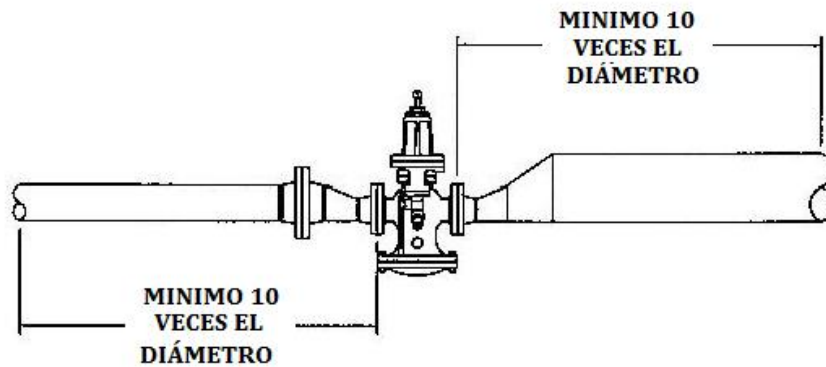


Fuente: Ref. [24]

2.6.4.1.2 *Tramo de tubería recta antes y después de la válvula.* Conectores, codos y otros accesorios contribuyen a la turbulencia del fluido en un sistema que puede resultar en un control errático.

Para limitar esto y asegurar una óptima operación del sistema, siga las indicaciones recomendadas para longitudes mínimas de tramos rectos antes y después de una reguladora.

Figura 17. Longitud de tuberías mínimas recomendadas

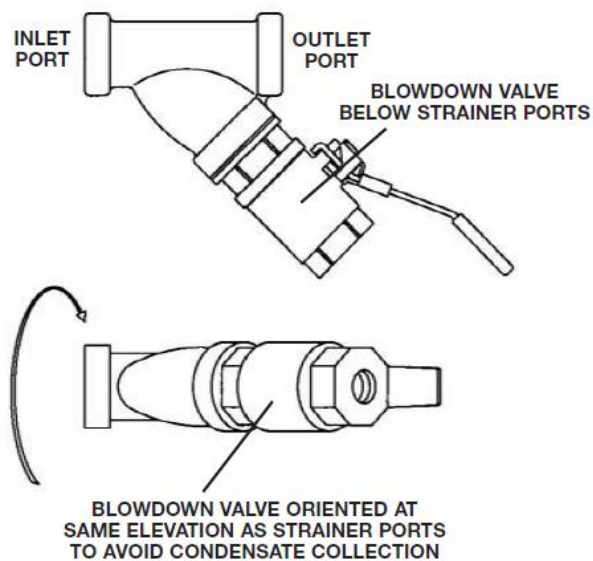


Fuente: Ref. [24]

2.6.4.1.3 *Filtros con válvulas de purga.* Independientemente de los filtros en una reguladora, un filtro con una válvula de purga se recomienda antes (aguas arriba) de todas las instalaciones de la reguladora.

Los residuos e incrustaciones en una tubería pueden dañar los componentes internos de la válvula que puede conducir a un mal funcionamiento y/o falla. [24]

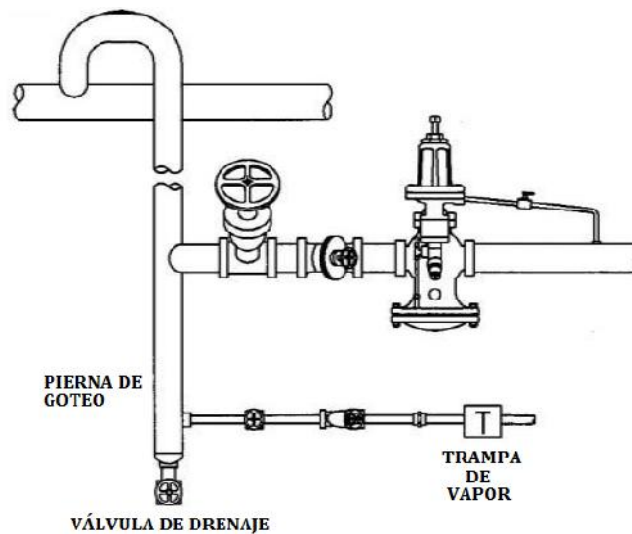
Figura 18. Filtro con válvula de purga



Fuente: Ref. [24]

2.6.4.1.4 *Piernas colectoras de condensado y trampas de vapor.* Para evitar la acumulación de condensado durante el cierre con la posibilidad de dañar la reguladora o la tubería en el arranque, un dimensionamiento adecuado de la pierna colectora de condensado con una trampa de vapor debe instalarse antes de todos los reguladores. Esto también ayudará a proteger la reguladora durante la operación normal.

Figura 19. Pierna colectora antes de las válvulas reguladoras

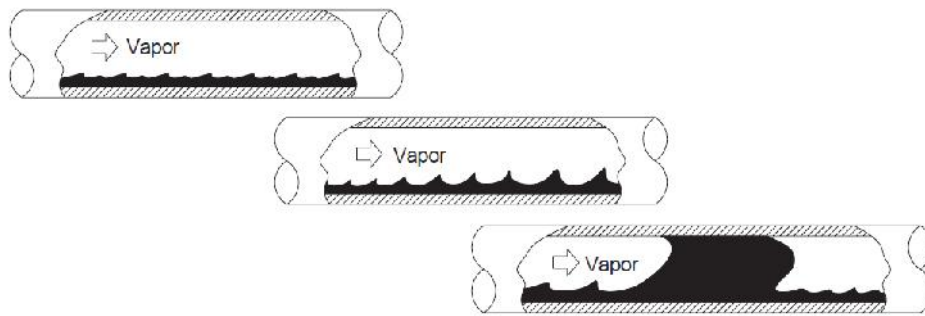


Fuente: Ref. [24]

2.6.5 *Golpe de ariete y sus efectos* [25] [26]. El golpe de ariete se produce cuando el condensado en lugar de ser purgado en los puntos bajos del sistema, es arrastrado por el vapor a lo largo de la tubería, y se detiene bruscamente al impactar contra algún obstáculo del sistema.

Las gotitas de condensado acumuladas a lo largo de la tubería, con el tiempo forman una bolsa sólida de agua que será arrastrada por la tubería a la velocidad del vapor. Esta bolsa de agua es densa e incompresible y cuando viaja a una velocidad elevada, tiene una energía cinética considerable.

Figura 20. Formación de una bolsa “sólida” de agua



Fuente: Ref. [25]

Cuando se obstruye su paso, a causa de una “T” en la tubería o una curva, la energía cinética se convierte en un golpe de presión que es aplicado contra el obstáculo.

Normalmente se produce un ruido de golpe, que puede ir acompañado del movimiento de la tubería. En casos serios, los accesorios pueden incluso romperse con un efecto casi explosivo con la consecuente pérdida de vapor vivo en la rotura, creando una situación peligrosa.

Afortunadamente, el golpe de ariete se puede evitar si se toman las medidas oportunas para que no se acumule el condensado en la tubería. [26]

2.6.6 Trampas para vapor y sus aplicaciones. Una trampa de vapor es una válvula automática que permite que el condensado, aire y otros gases no condensables sean descargados del sistema de vapor mientras se mantiene o atrapa el vapor del sistema. [27]

2.6.6.1 Generalidades [28] [27]

2.6.6.1.1 *Condensado.* Cuando el vapor libera su energía calorífica en un intercambiador de calor, desde una tubería conduciendo vapor o a partir de cualquier proceso, el vapor se convierte en agua.

Esta agua conocida técnicamente como condensado, debe ser separada del vapor y removida del sistema. La remoción del condensado a partir del vapor es considerada la principal función de una trampa de vapor.

2.6.6.1.2 *Aire.* El aire existe en todas las tuberías de vapor antes que el sistema comience a operar.

Este aire debe ser eliminado del sistema de tuberías de tal manera que el vapor pueda ingresar y eventualmente alcanzar las aplicaciones de procesos designadas. Si el aire no es removido, el vapor estará bloqueado a entrar en la tubería por el aire residual.

2.6.6.1.3 *Gases no-condensables.* Otros gases distintos del aire como el dióxido de carbono existen dentro de los sistemas de vapor.

Estos gases no condensables también debe ser separados del vapor y removidos del sistema para que todos los procesos operen apropiadamente.

2.6.6.2 *Categorías principales de las aplicaciones generales de las trampas de vapor*

2.6.6.2.1 *Aplicaciones de líneas de goteo.* Las líneas de goteo son en gran medida la aplicación más común de las trampas de vapor.

Esta aplicación se refiere a la remoción de condensado que se forma en las líneas de vapor cuando este pierde su energía calorífica debido a las pérdidas por radiación. Las trampas utilizadas en estas aplicaciones son conocidas como trampas de goteo. Por lo general, las trampas utilizadas en estas aplicaciones requieren capacidades de condensado relativamente pequeñas y normalmente no necesitan descargar grandes cantidades de aire.

2.6.6.2.2 *Aplicaciones de proceso.* Las aplicaciones de las trampas de proceso se refiere a la eliminación de condensado y aire directamente desde un proceso de transferencia de calor específico tal como en un intercambiador de calor, para producir agua caliente o un calefactor por radiación en una habitación.

Las trampas usadas en estas aplicaciones son conocidas como trampas de procesos. Por lo general, las trampas usadas para aplicaciones de procesos requieren mayor capacidad de manejo de condensado y también deben ser capaces de descargar grandes cantidades de aire.

2.6.6.2.3 *Aplicaciones para venas de calentamiento.* Se refiere al uso del vapor para elevar indirectamente la temperatura de otro fluido utilizando tuberías enchaquetadas o pequeños tubos enrollados a la tubería que transporta el fluido a calentar.

Una aplicación típica sería envolver una tubería de aceite de alta viscosidad con unos tubos pequeños que transportan vapor. El vapor del interior del tubo calienta el aceite para disminuir su viscosidad, permitiéndole fluir fácilmente a través de la tubería. Las trampas de vapor usadas en estas aplicaciones se conocen como trampas para venas de calentamiento.

2.6.6.3 *Clasificación de las trampas de vapor* [28] [29]. Existen diferentes tipos de trampas de vapor, cada tipo diseñado para diversas funciones y se clasifican de la siguiente manera:

Mecánicas

Termostática

Termodinámica

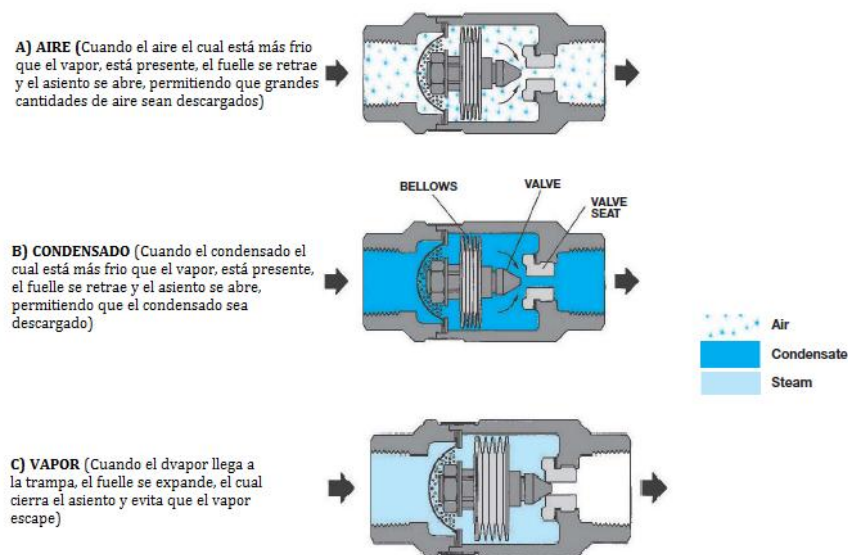
2.6.6.3.1 *Trampas para vapor termostáticas y bimetálicas* [28] [29]. Las trampas de vapor termostáticas y bimetálicas operan bajo la influencia directa del incremento o disminución de temperatura dentro del cuerpo de la trampa.

Estos dos tipos de trampas de vapor funcionan de manera diferente para adaptarse a aplicaciones específicas.

- *Trampas para vapor termostáticas.* El fuelle de la trampa de tipo termostática utiliza un líquido de llenado de un elemento térmico (fuelle) que opera bajo el principio de contracción y expansión térmica.

El fluido se evapora y se expande a medida que la temperatura aumenta provocando que el fuelle cierre la válvula. A medida que la temperatura disminuye, el fluido se condensa y se contrae, provocando que el fuelle abra la válvula. Estas trampas proporcionan una excelente capacidad de desalojo de aire y son utilizadas para goteo, rastreo y aplicaciones de procesos.

Figura 21. Funcionamiento Trampa de vapor termostática



Fuente: Ref. [28]

- *Trampas de vapor bimetálicas.* Las trampas de vapor bimetálicas operan bajo el principio de la expansión térmica de los metales.

Dos metales diferentes se juntan en una serie de discos que al calentarse se dilatan para proporcionar el movimiento para cerrar la válvula. Estas trampas son usadas principalmente en calentamiento con vapor debido a su capacidad para ajustar la temperatura de descarga de condensado, la cual puede ser deseable en ciertas aplicaciones de calentamiento. Cuando están presentes el aire y el condensado frío, la trampa bimetálica permanece abierta mientras que el flujo de aire y condensado son descargados del sistema.

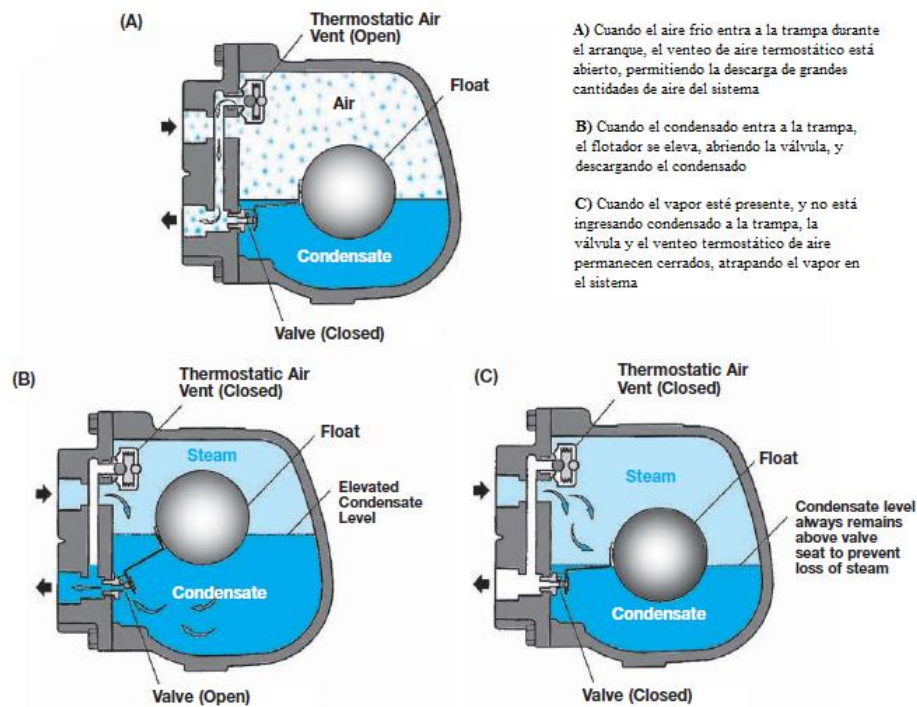
2.6.6.3.2 *Trampas para vapor mecánicas* [28] [29]. Las trampas de vapor mecánicas operan utilizando un dispositivo flotador conectado a un mecanismo que reacciona a los cambios de volumen o de densidad del fluido.

Hay dos tipos principales de trampas mecánicas: las trampas de flotador & termostato (F&T), y la trampa de balde invertido.

- *Trampas de flotador & termostato (F&T).* La trampa de flotador y termostato utiliza un flotador conectado mediante una articulación al tapón de la válvula para descargar el condensado del sistema.

Adicionalmente, las trampas F&T contienen un venteo termostático de aire para permitir la descarga del sistema. Por esta razón, estas trampas tienen una excelente capacidad para remover el aire, lo cual es ventajoso durante el arranque del sistema cuando grandes cantidades de aire están presentes en el sistema. Las trampas de vapor de flotador y termostato son por lo general la principal selección para el drenaje de equipos de transferencia de calor en los procesos.

Figura 22. Funcionamiento trampa de flotador & termostato (F&T)

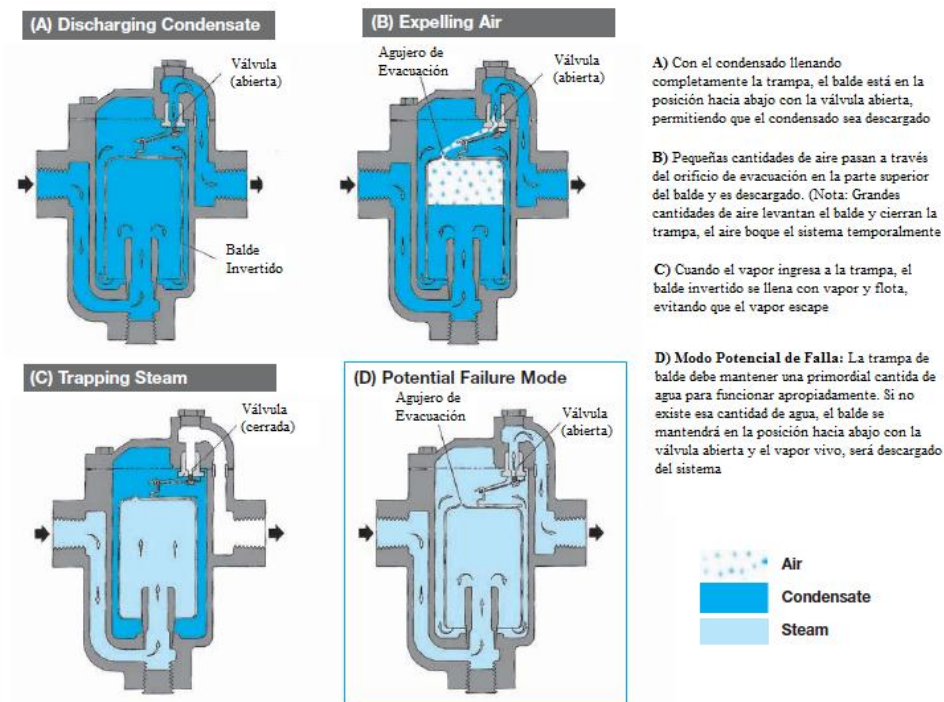


Fuente: Ref. [28]

- *Trampas de balde invertido.* La trampa de balde invertido usa un balde invertido como dispositivo flotador conectado a una articulación al tapón de la válvula.

La variación de densidades entre el vapor y el condensado son utilizadas para crear una fuerza de flotación sobre la cubeta para abrir o cerrar la válvula. Estas trampas son utilizadas primordialmente en aplicaciones de goteo en líneas principales y en líneas de suministro de vapor. Estas trampas por lo general no son utilizadas en aplicaciones de procesos debido a su pobre capacidad de manejo de aire. Las trampas de balde son extremadamente robustas y resistentes a los golpes de ariete y a la suciedad que pueda estar presente en el sistema.

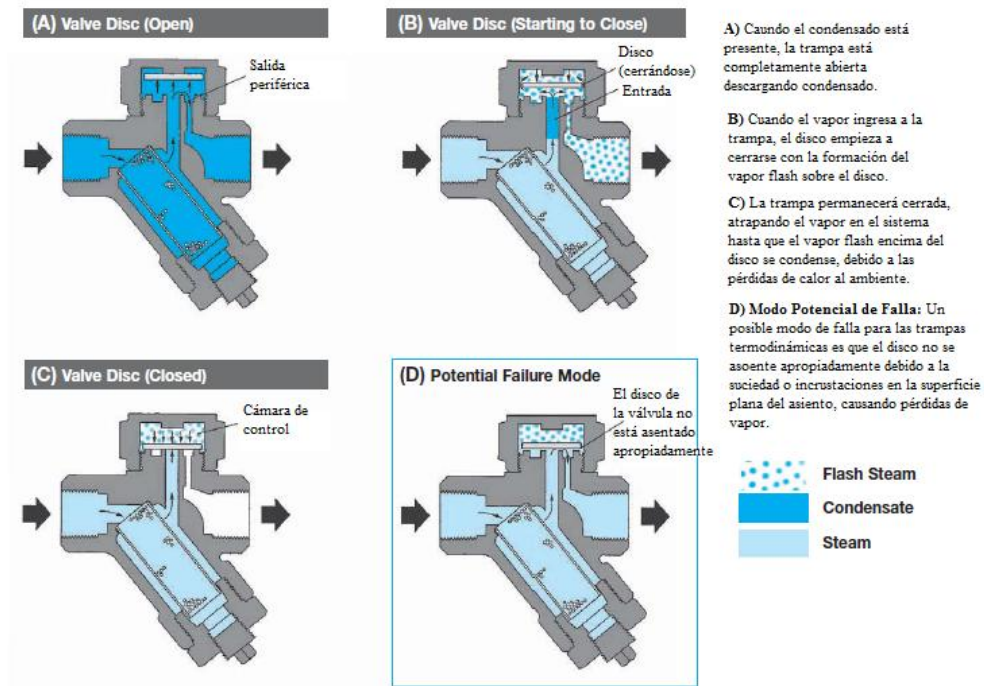
Figura 23. Funcionamiento trampa de balde invertido



Fuente: Ref. [28]

2.6.6.3.3 *Trampas para vapor termodinámicas* [28] [29]. Las trampas para vapor termodinámicas operan en un proceso cíclico de encendido/apagado utilizando las propiedades termodinámicas del vapor flash a medida que fluye a través de la trampa. Las trampas termodinámicas solo usan una parte móvil, el disco de válvula, que le permite al condensado escapar cuando está presente y se cierra herméticamente a la llegada del vapor. Estas trampas tienen un diseño inherentemente resistente y se utilizan comúnmente como trampas de goteo en la red de vapor y en las líneas de suministro.

Figura 24. Funcionamiento trampa termodinámica



Fuente: Ref. [28]

2.7 Bombas y sus aplicaciones

2.7.1 Introducción. Las bombas son de gran importancia en el trasiego de fluidos, debido a su capacidad de producir vacío, con lo cual se puede empujar el fluido hacia donde se desee transportar.

Existen una infinidad de bombas las cuales tienen distintas funciones, todo depende del tipo de fluido, de la temperatura a la cual se va a transportar y la presión que soportará.

[30]

2.7.2 Principio y clasificación. Un equipo de bombeo es un transformador de energía, mecánica que puede proceder de un motor eléctrico, térmico, etc.

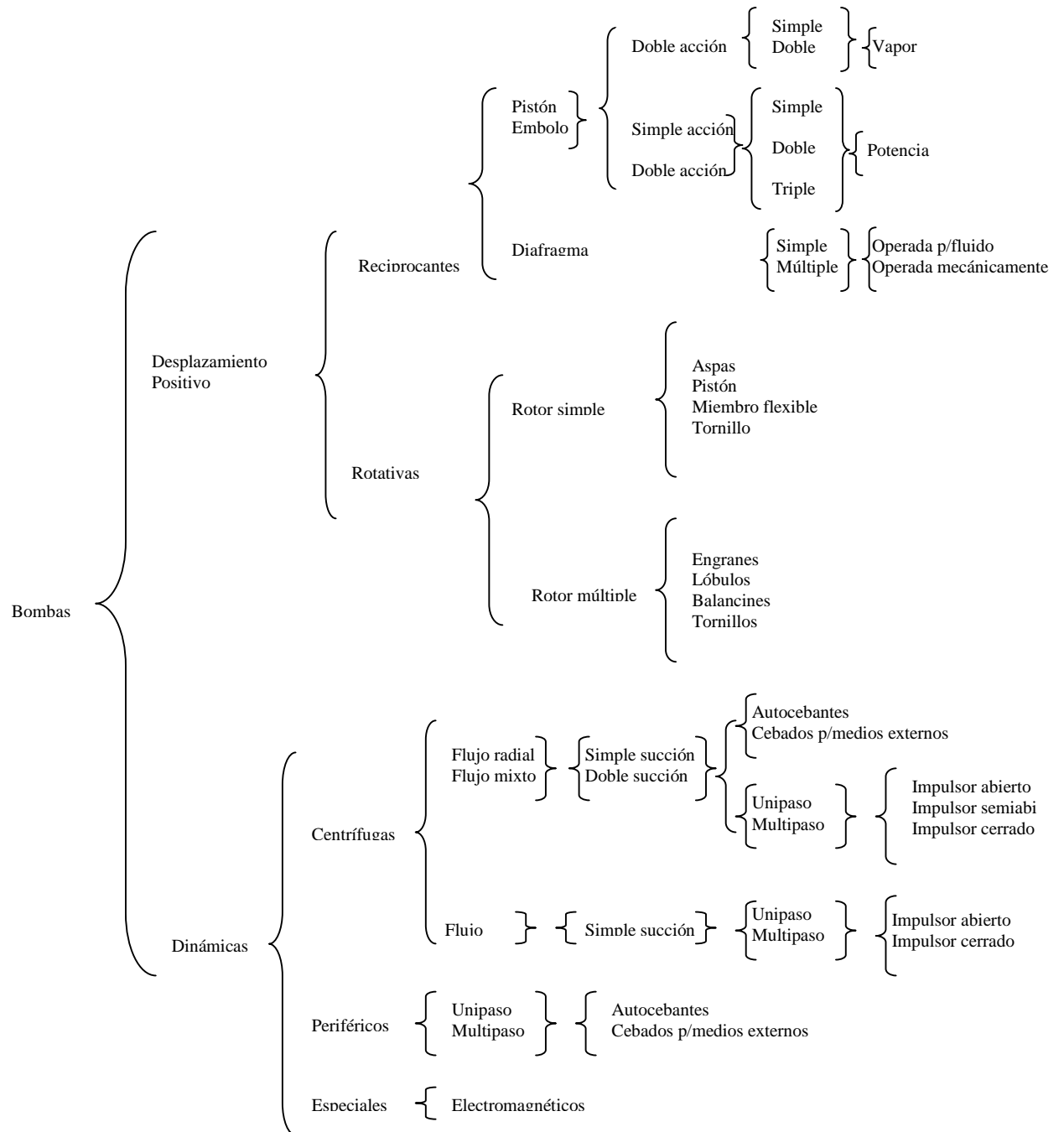
Y la convierte en energía, que un fluido adquiere en forma de presión, de posición y de velocidad.

Existe una diversidad de clasificación de bombas que ocasionalmente puede causar confusión al intentar ubicarlas dentro de un cierto tipo, clave u otra distinción, sin embargo la más adecuada para propósitos de este trabajo es la proporcionada por el instituto de Hidráulica de los Estados Unidos de América.

Un ejemplo de bombas que adicionan energía de presión sería una bomba en un oleoducto, en donde las cotas de altura así como los diámetros de tuberías y consecuentemente las velocidades fuesen iguales, en tanto que la presión fuese incrementada para poder vencer las pérdidas de fricción que se tuviesen en la conducción.

Existen bombas que trabajan con presiones y alturas iguales que únicamente adicionan energía de velocidad. Sin embargo a este respecto hay muchas confusiones en los términos presión y velocidad por la acepción que llevan implícita de las expresiones fuerza-tiempo. En la mayoría de las aplicaciones de energía conferida por la bomba es una mezcla de las tres. Las cuales se comportan de acuerdo con las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos. [31]

Figura 25. Diagrama de clasificación de bombas



Fuente: Ref. [32] [33]

2.7.3 *Pérdidas primarias y secundarias en la tubería*

2.7.3.1 *Pérdidas primarias.* Se produce cuando el fluido se pone en contacto con la superficie de la tubería.

Esto provoca que se rocen unas capas con otras (flujo laminar) o de partículas de fluidos entre sí (flujo turbulento). Estas pérdidas se realizan solo en tramos de tuberías de diámetro constante. [34]

2.7.3.2 *Pérdidas secundarias.* Se produce en transición de la tubería (estrechamiento o expansión) y en toda clase de accesorios (válvulas, codos, etc.) [35]

2.7.4 *Altura neta positiva en la aspiración (NPSH).* Por definición el NPSH es la altura total de carga a la entrada de la bomba, medida con relación al plano de referencias, aumentada de la altura correspondiente a la presión atmosférica y disminuida de la altura debida a la tensión de vapor del líquido. [35][36]

Hay Que tener presente dos conceptos:

2.7.4.1 *NPSH Requerido.* Presión absoluta mínima en el orificio de aspiración del impulsor que garantiza un flujo sano en el interior de la bomba.

Es un dato básico característico de cada tipo de bomba, variable según el modelo y tamaño y condiciones de servicio, por tanto es un dato que facilitan los fabricantes. [37]

2.7.4.2 *NPSH Disponible.* Presión absoluta total en el orificio de aspiración del impulsor como resultado final de la aspiración específica de las condiciones de la instalación.

Es función de la instalación e independiente del tipo de bomba.

El conocimiento del NPSH disponible por el instalador es fundamental para la elección adecuada de la bomba y evitar así posibles fracasos. [37]

2.7.5 *Cavitación.* La cavitación es un fenómeno indeseable que puede ocurrir durante el funcionamiento de las bombas centrífugas.

Es importante señalar que la cavitación se produce debido a algún error durante el diseño del sistema de bombeo.

Si la bomba centrífuga trata de expulsar más líquido del que puede absorber se producirá un efecto de vacío en el interior de la bomba. Esto, obviamente, reducirá la presión por lo que se producirán burbujas de vapor (dicho de otra forma, cuando se alcanza la presión de vapor, el fluido se vaporiza y forma pequeñas burbujas de vapor) que principalmente rozarán a los álabes de los impulsores de la bomba, sin dejar de afectar otros componentes.

La cavitación tiene un efecto realmente destructivo (llamado corrosión por cavitación) en la estructura de la bomba centrífuga. Entre las características de una bomba centrífuga que ha sufrido daños por cavitación puede destacarse la erosión de los impulsores de la bomba centrífuga, la cual se da a tal grado, que las paredes del mismo pueden llegar a alcanzar el espesor de un papel, e inclusive, presentar grandes perforaciones con bordes muy afilados. [38] [39]

2.7.5.1 *Tipos de Cavitación.* Suele clasificarse en dos tipos:

- Cavitación de succión: La cavitación de succión ocurre si la succión de la bomba centrífuga se encuentra en condiciones de baja presión y consecuentemente alto vacío por lo que el líquido se transforma en vapor a la entrada del impulsor.
- Cavitación de descarga: La cavitación de descarga ocurre a causa de que la descarga de la bomba centrífuga se encuentra muy elevada. [40]

Figura 26. Desgaste producido por la cavitación en un rodete de la bomba



Fuente: Ref. [41]

2.7.6 *Bombas neumáticas.* La bomba neumática de doble membrana o bomba de diafragma fue inventada en 1955 por Jim Wilden, que creó la empresa todavía líder en la actualidad Wilden Pump & Engineering.

Es un tipo de bomba de desplazamiento positivo alternativo, en la que el aumento de presión se realiza por el empuje de unas membranas elásticas (o diafragmas) que permiten crear un volumen variable en la cámara de bombeo, aumentándola en la fase de aspiración y reduciéndola en la fase de expulsión del fluido. Unas válvulas de retención (normalmente de bolas, pero también de tipo clapetas rígidas o seta) controlan que el movimiento del fluido se realice de la zona de menor presión a la de mayor presión. La acción de estas bombas es neumática, o sea que se aprovecha la presión del aire comprimido, o de cualquier otro gas compatible con el uso. [42] [43]

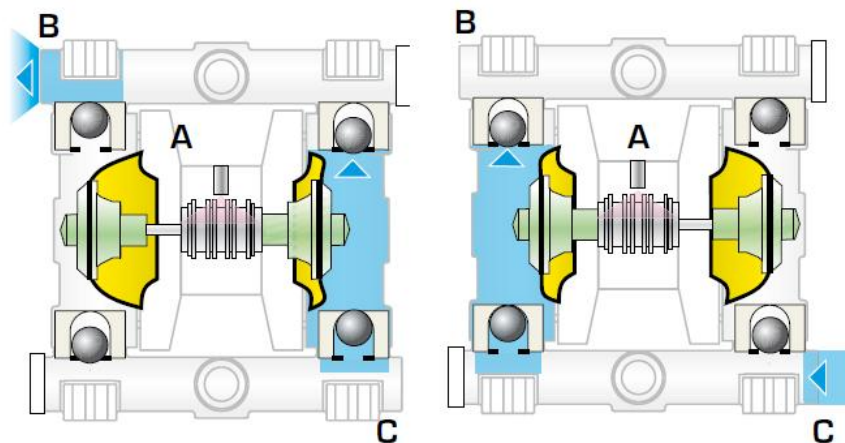
Figura 27. Bomba neumática Wilden tipo P8



Fuente: Ref. [43]

2.7.6.1 *Funcionamiento*. El aire comprimido introducido por el intercambiador coaxial “A” (ver figura 28). Detrás de una de las membranas determina la compresión y empuja el producto en el conducto de descarga “B” contemporáneamente, la membrana opuesta y solidaria al eje del intercambiador crea una depresión aspirando el fluido “C”. Una vez completada la carrera, el intercambiador coaxial neumático desvía el aire comprimido detrás de la membrana opuesta y el ciclo se invierte. [44] [59]

Figura 28. Funcionamiento bomba neumática



Fuente: Ref. [45]

2.7.6.2 *Aplicaciones de las bombas neumáticas.* El principio de funcionamiento, sorprendente por su sencillez, es sinónimo de polivalencia y fiabilidad en la industria.

Ofrecen ventajas claras frente a otros tipos de bombas, ya que no poseen cierres mecánicos ni empaquetaduras que son las principales causas de rotura de los equipos de bombeo en condiciones severas o por trabajo en seco. Estas bombas son autocebantes, es decir, no es necesario llenar la columna de aspiración de líquido para que funcionen. Su mantenimiento es sencillo y rápido y con componentes fáciles de sustituir. Según el tipo de válvulas utilizadas, tienen una buena o muy buena aceptación de sólidos en suspensión.

Debido a la resistencia a la corrosión de estas bombas y a no ser necesario cebarlas para que funcionen, estos equipos son muy utilizados en la industria para el movimiento de prácticamente cualquier líquido y en multitud de industrias como ácidos, derivados del petróleo, disolventes, pinturas, barnices, tintas, fangos de depuradora, reactivos, concentrados de frutas, chocolate, plantas de proceso, industrias químicas, industrias alimentarias, ópticas, industrias galvánicas, bebidas, aguas residuales, minerías, construcción, buques, industrias cerámicas, cartoneras, fábricas de papel o circuitos impresos. [45]

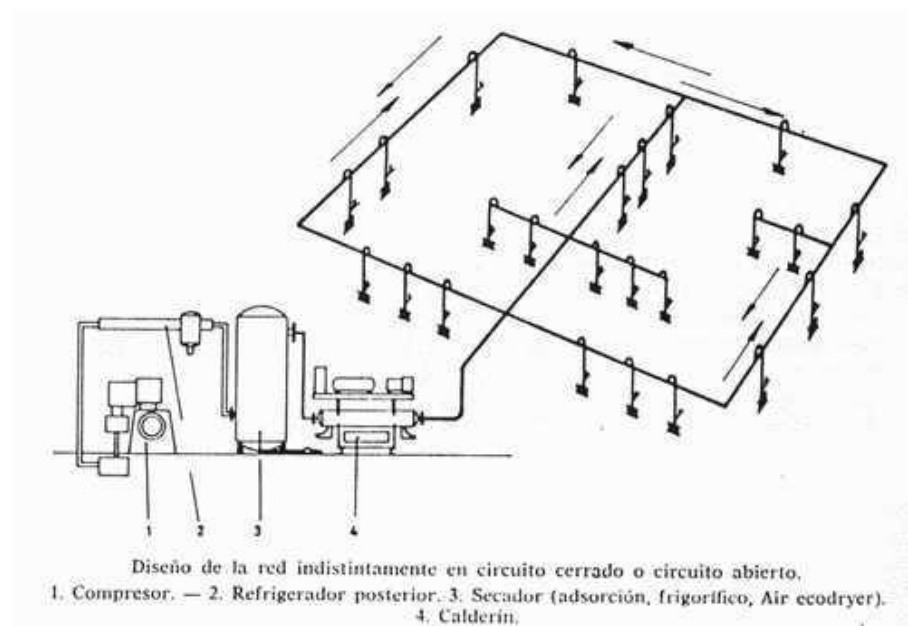
2.8 Sistemas de aire comprimido

El aire comprimido es un elemento muy habitual en todo tipo de instalación industrial. Normalmente se emplea para obtener trabajo mecánico lineal o rotativo, asociado al desplazamiento de un pistón o de un motor neumático. En otras ocasiones, se emplea para atomizar o aplicar spray de barnices o pinturas, que de otra forma son difíciles de bombear. [46]

2.8.1 *Elementos básicos de una instalación de aire comprimido* [48]. Los elementos principales que componen una instalación de aire comprimido son:

El compresor (que incluye normalmente un depósito de almacenamiento de aire comprimido), el enfriador (aftercooler), un deshumificador (separador), las líneas de suministro, y los puntos de consumo con regulador y filtro.

Figura 29. Instalación de aire comprimido



Fuente: Ref. [47]

2.8.1.1 *Compresor*. El compresor aspira aire de la atmósfera y lo comprime en un volumen más pequeño, almacenándolo después normalmente en un depósito.

Básicamente, hay cinco tipos de compresores de aire que se emplean en la industria, que se agrupan a su vez dentro de dos grandes familias: compresores de desplazamiento positivo (CDP) y compresores rotodinámicos o turbocompresores (TC).

2.8.1.2 *Depósito*. Normalmente suele ir integrado dentro del compresor, como una parte más de la unidad que proporciona aire comprimido.

De hecho, los compresores suelen trabajar de forma discontinua, arrancando cuando la cantidad de aire que queda almacenada en el compresor es baja. Además el depósito sirve para amortiguar las fluctuaciones de caudal que vienen del compresor (especialmente en los CDP) y evitar que se transmitan a los puntos de consumo.

2.8.1.3 *Aftercooler*. Puesto que al comprimir el aire éste se calienta, su capacidad para retener vapor de agua aumenta.

Por el contrario, un incremento en la presión del aire, reduce notablemente su capacidad para retener agua. Por lo tanto, mientras el aire se comprime en el compresor, la alta temperatura evita que el agua condense, pero una vez en las conducciones, el descenso de temperatura, mantenido a presiones altas, sí conlleva la condensación de agua en las tuberías.

Por lo tanto, para eliminar posibles condensaciones, se reduce la temperatura del aire en un dispositivo que se coloca justo a la salida del compresor. Para ello se introduce un enfriador (*aftercooler*), tan próximo al compresor como sea posible.

El *aftercooler* no es más que un intercambiador de calor, que puede funcionar bien con agua o con aire como fluido enfriador.

2.8.1.4 *Deshumificador*. Es el elemento encargado de retirar la condensación que se ha precipitado desde el enfriador.

2.8.1.5 *Líneas de suministro*. Puesto que el compresor, el depósito y los enfriadores suelen situarse en una sala.

Es preciso diseñar la distribución en planta de las líneas de suministro desde el compresor a los puntos de consumo.

2.8.1.6 *Puntos de consumo*. En los puntos de consumo es habitual colocar un filtro final así como un regulador de presión que acondicione finalmente el suministro de aire comprimido.

Normalmente, estos filtros en el punto de consumo permiten retener aquellas partículas que sean de tamaño inferior a las características de filtrado de elementos previos. [47] [48] [49]

Figura 30. Filtro con reguladora de presión



Fuente: Ref. [47]

2.9 Funcionamiento columna de destilación

Biodiesel (metil éster) es la transesterificación de aceite vegetal mediante el uso de metanol y KOH / NaOH como catalizador. La reacción se lleva a cabo en 2 reactores. La esterificación se lleva a cabo a aproximadamente 80 - 90% de nivel en el primer reactor. La glicerina que lleva metanol se separa. Más metanol se mezcla en segundo reactor para completar la esterificación restante, la fase de glicerina se separa de nuevo. El consumo de metanol es de aproximadamente 10% del peso de aceite de entrada, pero la cantidad en exceso de metanol se utiliza para la reacción. El exceso de metanol va con la fase biodiesel, así como con la fase de glicerina. La fase de biodiesel tiene

aproximadamente 10% de metanol y la fase de glicerina tiene aproximadamente 40% a 50% de metanol. La fase de biodiesel también contiene cierta cantidad de jabón y tiene que ser lavado con agua para eliminar el jabón.

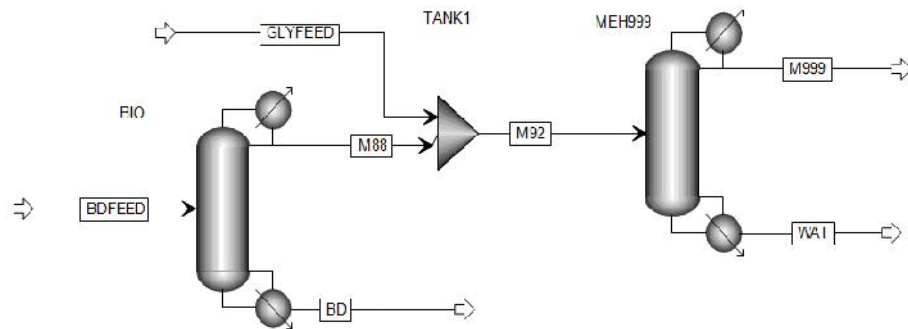
2.9.1 *Sistema de recuperación de metanol fénix* [50] [51]. Para la recuperación de metanol, las siguientes rutas son posibles:

2.9.1.1 *Esquema de 2 columnas*. La alimentación que contiene biodiesel, glicerina, agua y metanol alimenta a una columna de destilación continua atmosférica para separar el metanol 97% de pureza (en peso) de la parte superior.

La columna es empaquetada con el relleno estructurado fénix. Este metanol de 97% (en peso) se destila en columna separada para recuperar metanol de 99,9% (en peso) de pureza, que se recicla de nuevo al reactor. La recuperación del metanol es mayor al 95%. El biodiesel y la glicerina son fases separadas. La glicerina todavía contiene aproximadamente 10% de agua y algunos residuos de metanol. El grado BP de la Glicerina (99,5% en peso) se puede lograr mediante el uso de columna de destilación al vacío por lotes.

Fase biodiesel se lava con agua, ya que puede contener jabón y residuos de metanol y, finalmente, puede ser deshidratada en un evaporador al vacío, como se muestra en la figura 31.

Figura 31. Recuperación de metanol 2 columnas

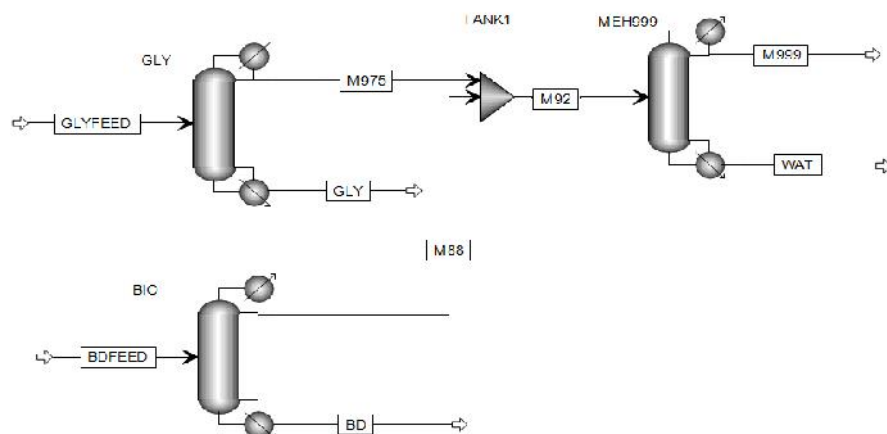


Fuente: Ref. [51]

2.9.1.2 *Régimen de columna*. Las fases de biodiesel y glicerina se separan en primer lugar. El biodiesel contiene aproximadamente 10% (en peso) de metanol mientras que la glicerina contiene aproximadamente 50-60% (en peso).

A partir de estas dos corrientes diferentes, metanol de 97% (en peso) puede ser recuperado usando dos diferentes columnas de destilación continua atmosférica. La columna es empaquetada con el relleno estructurado fénix. Este metanol se destila en una columna separada para recuperar metanol de 99,9% (en peso) de pureza, que se recicla de nuevo al reactor. La recuperación del metanol es mayor al 95%.

Figura 32. Recuperación de metanol 1 columna



Fuente: Ref. [51]

A veces el evaporador por separado es necesario si el contenido de agua en glicerina es mayor al 30% (en peso). El grado BP de la glicerina (99,5% en peso) se puede lograr mediante el uso de la columna de destilación al vacío por lotes.

La fase de biodiesel se lava con agua, ya que puede contener jabón y residuos de metanol y puede ser deshidratada en un evaporador al vacío.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO DE LOS SERVICIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA COLUMNA DE DESTILACIÓN

3.1 Parámetros para el diseño

Como este proyecto es ejecutado con el objetivo de manejar sustancias inflamables como es el caso del metanol y por su ubicación en la fábrica, se tiene que tomar en cuenta varios parámetros y normas de seguridad tanto en materiales y equipos establecidos por normas, códigos, manuales técnicos especializados, para así garantizar el bienestar de los trabajadores y de la empresa.

Para el dimensionamiento de tuberías de vapor, distribuidores de vapor, tuberías de conducción de metanol y selección de los materiales adecuados se ha tomado en consideración la norma técnica americana ASME B31.1; así como manuales técnicos referentes a sistemas de distribución de vapor de varias empresas reconocidas como Spirax Sarco y Watson McDaniel.

3.2 Funcionamiento de la columna de destilación²

El metanol contaminado es impulsado desde los tanques de almacenamiento, y alimentan a las columnas C-101 y C-201. Cuando alcanza el nivel de llenado se acciona las bombas P-101 y P-201, el fluido se conduce a través de los calentadores RB-101 Y RB-201 que funcionan a base de vapor, con el propósito de elevar la temperatura para evaporar el fluido y que las fases más volátiles se separen, en este caso el metanol y el agua.

El conjunto de gases alimentan a la columna de destilación C-301, cuya función es separar los dos compuestos, como la temperatura de evaporación del metanol es a 65,5 °C, el agua se condensa y se almacena en la sección inferior mientras que el metanol se

² Para mejor comprensión ver anexo C III

eleva hasta la sección superior, para evitar que algún residuo de metanol esté presente en la sección inferior, el fluido se conduce a través del calentador RB-301 completando así la separación.

El metanol evaporado es captado y condensado mediante el uso del intercambiador de calor CD-301, que trabaja con agua como fluido de enfriamiento y que es alimentado con agua proveniente de una torre de enfriamiento.

Una vez que el metanol se condensa, se acumula en el tanque RD-301, donde se comprueba la pureza del elemento y de ahí se conduce a los tanques de almacenamiento correspondientes. Si el fluido no presenta la pureza necesaria, es decir del 99.9%, se introduce de nuevo a la columna de rectificación mediante una recirculación repitiéndose el mismo proceso, obteniendo un producto con mayor pureza.

3.3 Selección de las tuberías de transporte de metanol

El metanol recuperado en estado líquido luego del proceso de obtención del biodiesel, es almacenado en dos tanques de acero inoxidable denominados TT2 Y TT3. (Ver anexo D VII)

1. El tanque TT2 contiene metanol contaminado con biodiesel, y este es el tanque que suministra producto a la columna C-101.
2. El tanque TT3 contiene metanol contaminado con glicerina, y este es el tanque que suministra producto a la columna C-201.

Es decir, que desde estos tanques de almacenamiento tenemos que impulsar el fluido hacia las columnas C-101 Y C-201 (ver anexo D I), para lo cual primero tenemos que dimensionar el sistema de bombeo que satisfaga los requerimientos necesarios de trabajo y de consumo.

3.3.1 *Dimensionamiento de las bombas de alimentación de metanol.* Para el dimensionamiento de la bomba hemos considerado las condiciones de operación desde el tanque TT2 hacia la columna C-101.

Como el fluido a transportar es metanol en su mayor parte, un alcohol sumamente inflamable, se optó por utilizar bombas neumáticas cuyo material de fabricación es el polipropileno, por recomendación de la guía de resistencia química de la fábrica Wilden (Ver anexo B IV).

Para la selección de este tipo de bombas se debe conocer el caudal de bombeo, el diámetro de la tubería necesaria y la carga dinámica total TDH.

3.3.1.1 *Dimensionamiento de la tubería de descarga.* Los datos conocidos del producto a ser transportado y las condiciones de trabajo, se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Datos para dimensionar la bomba

| Producto | Metanol | | | |
|---------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|
| Temperatura | 25 | °C | 77,00 | °F |
| Densidad absoluta | 787 | Kg/m ³ | | |
| Viscosidad dinámica | 0,541 | Cp | 0,00054 | Pa.s |
| Caudal | 12 | TN/h | 15,25 | m ³ /h |

Fuente: Autor

Por recomendaciones generales la velocidad del fluido dentro de una tubería debe estar entre el rango de 1,5 a 2,4 m/s (ver anexo BI), entonces para encontrar la velocidad utilizamos la ecuación 1. [52] [53]

$$V = \dot{q} / (A * 3600) \quad (1)$$

Dónde:

V: Velocidad del fluido [m/s]

\dot{q} : Caudal del fluido [m³/h]

A: Área de la sección interna de la tubería [m²]

$$A = \pi * D_i^2 / 4 \quad (2)$$

Utilizando la ecuación 1 y 2, además con los valores de la tabla 1, encontramos la velocidad del fluido; como el área es desconocida debemos iterar con los diámetros estandarizados hasta encontrar una velocidad apropiada³. Dando como resultado los valores de la tabla 2.

Tabla 2. Valores de velocidad calculados

| Tubería SCH40 nueva | | | |
|----------------------------|------------------|-----|------------------|
| | Diámetro nominal | | Diámetro interno |
| Diámetro de descarga | 2 | in | 52,5 mm |
| Velocidad de descarga | 1,96 | m/s | |

Fuente: Autor

Como la velocidad calcula está en el rango asumimos que la tubería de descarga es de 2 pulgadas.

3.3.1.1.1 Cálculo de las pérdidas primarias en la descarga (H_f)

- *Cálculo del número de Reynolds.* Con la velocidad calculada en el ítem anterior procedemos a calcular el número de Reynolds mediante la utilización de la fórmula 3.

$$Re = D_i * V * \delta / 1000 * \mu \quad (3)$$

Dónde:

Re: Número de Reynolds

D_i : Diámetro interno de la tubería [mm]

V: Velocidad del fluido [m/s]

δ : Densidad del fluido [kg/m^3]

μ : Viscosidad dinámica del fluido [Pa.s]

³ Para observar el proceso de iteración ver anexo AI

Reemplazando los valores obtenidos anteriormente en la ecuación, se obtienen:

$$Re = (52,5 * 1,957 * 787)/(100 * 0,00054)$$

$$R = 149428,11$$

- *Determinación del factor de fricción.* Con Reynolds calculado y con el diámetro nominal de la tubería determinamos el factor de fricción en el diagrama de Moody (Ver anexo B XII), dando como resultado:

Tabla 3. Factor de fricción

| Diagrama de Moody | |
|-----------------------------|--------|
| Factor de fricción descarga | 0,0210 |

Fuente: Crane, flujo de fluidos en válvulas y accesorios

- *Cálculo de las pérdidas primarias.* Se conoce como pérdidas primarias a las pérdidas por longitud de tubería, las longitudes medidas desde el punto de alimentación hasta el punto de llegada se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Longitudes de tuberías

| Longitud de tubería | | |
|----------------------------|----|---|
| Longitud total de succión | 1 | m |
| Longitud total de descarga | 35 | m |

Fuente: Autor

Mediante la utilización de la fórmula 4, calculamos las pérdidas primarias tanto en la succión como en la descarga.

$$H_f = 1000 * L * V^2 * f/2 * g * D_i \quad (4)$$

Dónde:

H_f : Pérdidas primarias de presión [m]

L: Longitud de tubería [m]

V: Velocidad del fluido [m/s]

f: Factor de fricción

g: Aceleración de la gravedad [m/s²]

Di: Diámetro interno de la tubería [mm]

Reemplazando los valores obtenidos anteriormente en la ecuación 4, obtenemos:

$$H_f = 1000 * 35 * (1,957)^2 * 0,021/2 * 9,8 * 52,5$$

$$H_f = 2,734 \text{ m}$$

3.3.1.1.2 *Cálculo de las pérdidas secundarias en la descarga (H_s).* Para determinar las pérdidas secundarias o conocidas también como pérdidas por accesorios, utilizamos la ecuación de Darcy de las pérdidas de carga secundarias, ecuación 5.

$$H_{rs} = k * V^2 / 2 * g \quad (5)$$

Dónde:

H_{rs}: Pérdidas de carga secundarias [m]

k: Coeficiente adimensional de pérdidas de carga secundaria

V: Velocidad del fluido [m/s]

g: Aceleración de la gravedad [m/s²]

También debemos conocer todos los accesorios que van a ser instalados, dichos elementos se resumen en la tabla 5.

Tabla 5. Accesorios instalados en la descarga

| Accesorios | Cantidad descarga | FACTOR*ft | Factor total |
|-------------------|----------------------|-----------|--------------|
| Codos 90° | 10 | 30 | 300 |
| Codos 45° | 0 | 16 | 0 |
| Tee 90° | 1 | 60 | 60 |
| Tee 180° | 0 | 20 | 0 |
| Válvula compuerta | 2 | 45 | 90 |
| Válvula check | 1 | 200 | 200 |

Fuente: Ref. [66]

Para determinar el coeficiente adimensional K, multiplicamos el factor total de la tabla 5 por el factor de fricción seleccionado de la tabla 6.

Tabla 6. Factores de fricción

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|--------|
| Factor de fricción f_t | 0,027 | 0,025 | 0,023 | 0,022 | 0,021 | 0,019 | 0,018 | 0,017 | 0,016 | 0,015 | 0,014 |
| Diámetro nominal(in) | ½ | ¾ | 1 | 1 ¼ | 1 ½ | 2 | 2 ½ , 3 | 4 | 5 | 6 | 8 , 10 |

Fuente: Ref. [66]

Por lo tanto el coeficiente adimensional total será la suma de los accesorios por el factor de fricción correspondiente al diámetro de 2 pulgadas.

$$k = (300 + 0 + 60 + 0 + 90 + 200) * 0,019$$

$$k = 12,35 \text{ m}$$

Reemplazando los valores obtenidos anteriormente, en la ecuación 5 obtenemos:

$$H_{rs} = 12,35 * 1,957^2 / 2 * 9,8$$

$$H_{rs} = 2,41 \text{ m}$$

3.3.1.2 *Dimensionamiento de la tubería de succión.* Con los datos de la tabla 1 y el mismo procedimiento anterior se determina los parámetros necesarios para la descarga, los resultados se resumen en la tabla 7.

Tabla 7. Pérdidas primarias y secundarias

| | | |
|--|-------------------------|-------------|
| Diámetro nominal succión | 2 in | Di=52,5 mm |
| Área interna succión | 0,002165 m ² | |
| Velocidad succión | 1,957 m/s | |
| Cálculo número de Reynolds | | |
| Reynolds succión | 149428,11 | |
| Diagrama de Moody | | |
| Factor de fricción en la succión | 0,0210 | |
| Pérdidas por longitud de tubería (primarias) | | |
| Longitud total succión | 1 m | |
| Pérdidas primarias en la succión H_f | 0,078 m | |
| Coeficiente de resistencia K en válvulas y accesorios | | |
| Accesorios | Cant. Suc. | Factor * ft |
| Codos 90° | 1 | 30 |
| Codos 45° | 0 | 16 |
| Tee 90° | 1 | 60 |
| Tee 180° | 0 | 20 |
| Válvula compuerta | 1 | 45 |
| Válvula check | 1 | 200 |
| K (succión) | 2,565 | |
| Pérdidas secundaria en la succión H_s | 0,50 m | |

Fuente: Autor

3.3.1.3 *Cálculo de la carga dinámica total.* Las condiciones de succión y descarga para nuestro sistema de bombeo se resumen en la tabla 8.

Tabla 8. Condiciones del sistema de bombeo

| | |
|--------------------------|------|
| Altura estática succión | 2 m |
| Presión succión | 0 m |
| | |
| Altura estática descarga | 10 m |
| Presión descarga | 0 m |

Fuente: Autor

Para determinar la carga dinámica total, conocida por sus siglas TDH, utilizamos la ecuación 6.

$$TDH = H_g + (P_s - P) + (V_s^2 - V_d^2)/2 * g + \sum H_f \quad (6)$$

Dónde:

H_g: altura estática total [m]

Ps: Presión en el tanque de succión [psi]

Pd: Presión en el tanque de descarga [psi]

Vs: Velocidad en la succión [m/s]

Vs: Velocidad en la descarga [m/s]

g: Aceleración de la gravedad [m/s²]

Hf: Pérdidas primarias y secundarias en la succión y la descarga [m]

$$H_g = h - h_s \quad (7)$$

Dónde:

h_d: altura de descarga

h_s: altura de succión

$$\sum H_f = H_{f_{\text{succión}}} + H_{f_{\text{descarga}}} + H_{rs_{\text{succión}}} + H_{rs_{\text{descarga}}} \quad (8)$$

Reemplazando los valores obtenidos anteriormente y los valores de la tabla 8, en las ecuaciones obtenemos:

$$\text{TDH} = (10 - 2) + (0 - 0) + [(1,957^2 - 1,957^2)/2 * 9,8] + (0,078 + 2,734 + 0,5 + 2,41)$$

$$\text{TDH} = 13,73 \text{ m}$$

$$\text{TDH} = 19,52 \text{ psi}$$

3.3.1.4 *Selección de la bomba a utilizar.* Las variables utilizadas para seleccionar la bomba son:

Tabla 9. Variables para la selección

| | | | | |
|--------|-------|------|-------|-----|
| TDH | 19,52 | psi | | |
| Caudal | 15,25 | m3/h | 67,14 | GLP |

Fuente: Autor

Dando como resultado una bomba de las siguientes características⁴:

Tabla 10. Características de la bomba seleccionada

| | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|
| Marca | WILDEN | |
| Tubería de succión | 2 | in |
| Tubería de descarga | 2 | in |
| Codificación ⁵ | PX8/PKAPP/WFS/WF/PWF | |
| Modelo | PX8 | PRO-FLO XTM |
| Pistón exterior | PK | POLIPROPILENO |
| Cámaras de aire | A | ALUMINIO |
| Cuerpo | P | POLIPROPILENO |
| Válvula | P | POLIPROPILENO |
| Diafragmas | WFS | WIL-FLEX |
| Válvula esféricas | WF | WIL-FLEX |
| Válvula de asiento | P | POLIPROPILENO |
| O-ring válvulas de asiento | WF | WIL-FLEX |

Fuente: Ref. [43]

Las condiciones de bombeo desde el tanque TT3 hacia la columna C_201 y los parámetros de trabajo se resumen en la tabla 11.

Tabla 11. Condiciones de trabajo sistema de bombeo TT2

| | | | | |
|-------------------------------------|---------|-------|---------|------|
| Producto | Metanol | | | |
| Temperatura | 25 | °C | 77,00 | °F |
| Densidad | 787 | Kg/m3 | | |
| Viscosidad | 0,541 | Cp | 0,00054 | Pa.s |
| Caudal | 12 | TN/h | 15,25 | m3/h |
| Diámetro de succión | 2 | in | 52,5 | mm |
| Diámetro de descarga | 2 | in | 52,5 | mm |
| Velocidad del fluido | 1,957 | m/s | | |
| Longitud de succión | 1 | m | | |
| Longitud de descarga | 32 | m | | |
| Pérdidas primarias en la succión | 0,078 | m | | |
| Pérdidas secundarias en la succión | 0,5 | m | | |
| Pérdidas primarias en la descarga | 2,50 | m | | |
| Pérdidas secundarias en la descarga | 2,41 | m | | |
| Altura estática de succión | 2 | m | | |
| Altura estática de descarga | 10 | m | | |
| Carga dinámica total | 13,49 | m | 19,19 | psi |

Fuente: Autor

⁴ Ver anexo B VI

⁵ Ver anexo B V

Como las condiciones de trabajo son similares al sistema de bombeo anterior, se decidió adquirir otra bomba de las mismas características resumidas en la tabla 10.

3.3.2 Características de la tubería seleccionada. Como el fluido a transportar es metanol, un alcohol no corrosivo para los metales, se podía optar por el uso de tubería de acero al carbono, pero por compatibilidad de los tanques de almacenamiento y recepción del fluido y además por el ambiente corrosivo conocido en la zona, se decidió utilizar tubería de acero inoxidable 304L de cédula 10.

El acero 304L es un acero inoxidable austenítico de las siguientes características químicas:

Tabla 12. Composición química del acero 304L

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni |
|------|------|------|-------|-------|-------|----|-------|
| 0,03 | 1,00 | 2,00 | 0,045 | 0,015 | 18,00 | – | 10,00 |
| | | | | | 20,00 | | 12,00 |

Fuente: Ref. [67]

3.4 Diseño de tuberías para transporte de vapor según la norma ASME B31.1

Para el dimensionamiento de las tuberías de vapor se ha tomado como referencia dos criterios:

- El dimensionamiento en base a la norma que rige este tipo de tuberías, la ASME B31.1_Tuberías en plantas de generación.
- El dimensionamiento en base a catálogos técnicos de Spirax Sarco y Watson McDaniel.

3.4.1 Dimensionamiento de la tubería de vapor principal. Los datos proporcionados para determinar el diámetro de la tubería se indican en la tabla 13.

Tabla 13. Valores proporcionados para el dimensionamiento de la tubería de vapor

| Datos | Flujo de vapor (\dot{q}) | | Volumen Especifico Vapor | Velocidad máxima |
|--------------------------------|---------------------------------|------|-----------------------------|---------------------|
| | kg/h | lb/h | | |
| Tubería de vapor a 175 psig | 1814 | 4000 | 2,40 | 6000 |

Fuente: Autor

Para determinar el área necesaria de la tubería para transportar vapor se utilizará la siguiente ecuación:

$$V = 2,4\dot{q} * v/A \quad (9)$$

$$A = 2,4\dot{q} * v/V$$

Dónde:

A: Área de sección transversal del tubo [in^2]

\dot{q} : Flujo de vapor en [lb/h]

v : Volumen específico del vapor en [ft^3/lb]

V: Velocidad del vapor en [ft/min]

Reemplazando los valores de la tabla 13 en la ecuación 9 se obtiene:

$$A = 2,4 (4000 \text{ lb/h})(2,4 \text{ ft}^3/\text{lb})/(6000 \text{ ft/min})$$

$$A = 3,84 \text{ in}^2$$

Para determinar el diámetro interno del tubo utilizamos la ecuación 10.

$$d = 2 (A/\pi)^{0,5} \quad (10)$$

Reemplazando obtenemos:

$$d = 2(3,84 \text{ in}^2/\pi)^{0,5}$$

$$d = 2,21 \text{ in} = 56,16 \text{ mm}$$

Para determinar el diámetro exterior del tubo asumimos que la tubería es de cédula 40, por la facilidad de adquisición que se presenta en el mercado.

Mediante la utilización de catálogos de tuberías seleccionamos el diámetro del tubo inmediatamente superior al necesario lo cual obtenemos una tubería de 2 ½ pulgadas pero por recomendaciones y para futuras ampliaciones de la planta se decidió seleccionar tubería de 3 pulgadas.

Por lo cual obtenemos las características de la tubería resumidas en la tabla 14.

Tabla 14. Características de la tubería seleccionada

| | DN in | Ø exterior mm (in) | Ø interior mm (in) | Espesor mm (in) |
|--------|--------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| SCH 40 | 3 | 88,9 (3,50) | 77,9 (3,068) | 5,49 (0,216) |

Fuente: Autor

3.4.2 *Cálculo del espesor mínimo de pared.* Como seleccionamos una tubería de cédula 40 debemos comprobar si el espesor dado soporta la presión de trabajo del vapor, para lo cual utilizamos la ecuación 11 dado por la norma ASME B31.1.

$$t_{\min} = \{DP/[2(SE + YP)]\} + C \quad (11)$$

Dónde:

t_{\min} : Espesor mínimo de pared [in]

D: Diámetro exterior del tubo [in]

P: Presión de diseño⁶ [lb/in²] (manométricas)

S: Esfuerzo permisible en el material del tubo [lb/in²]

Y: Coeficiente de temperatura

C: Factor de condición final [in]

E: Eficiencia de unión por soldadura

⁶ Presión de diseño= 1,5 x presión interna del tubo (donde el 1,5= coeficiente de seguridad definido por las normas ASME)

Por lo tanto las condiciones de operación y características de la tubería son:

Tubería de diámetro nominal: 3 in SCH. 40

Diámetro exterior de la tubería (D): 3,50 in

Material: ASTM A 53 Gr. B, sin costura (recomendación Norma ASME B31.1)

Presión interna de la tubería: 175 psig

Presión de diseño (P): 262,5 psig

Temperatura de trabajo: 190 °C (374°F)

Tipo de construcción: no soldada

Esfuerzo permisible (S): 15000 lb/in² (ver anexo B VII)

Eficiencia de unión por soldadura (E): 1 (ver anexo B VII)

Coefficiente de temperatura (Y): 0,4 (ver anexo B VIII)

Espesor por corrosión⁷ (C): 0,5 mm (0,02 in)

Reemplazando los valores en la ecuación 11 obtenemos:

$$t_{\min} = \{(3,50 \text{ in}) \cdot (262,5 \text{ lb/in}^2) / [2((15000 \text{ lb/in}^2) \cdot (1) + (0,4) \cdot (262,5 \text{ lb/in}^2))]\} + 0,02$$

$$t_{\min} = 0,0403 \text{ in} = 1,024 \text{ mm}$$

Para un correcto cálculo del espesor de la pared se debe considerar la tolerancia de fabricación de las cañerías, para lo cual se utilizará la ecuación 12.

$$t_{\text{nom}} = t_{\min} / 0,875 \quad (12)$$

Reemplazando los valores obtenemos:

$$t_{\text{nom}} = 0,0959 \text{ in} / 0,875$$

$$t_{\text{nom}} = 0,046 \text{ in} = 1,17 \text{ mm}$$

⁷ Recomendación norma ASME B31.1-2004, página 18

Por lo tanto se comprobó que el número de cédula asumido es correcto, ya que el espesor necesario es menor al espesor dado por el catálogo.

3.4.3 *Diseño de las tuberías de vapor para los procesos de recalentamiento.* Para calcular el diámetro necesario de las tuberías de distribución hacia los procesos utilizamos las ecuaciones 9 y 10, utilizando los datos especificados de la tabla 15.

Tabla 15. Datos de las tuberías de distribución

| Datos | Flujo de vapor (\dot{q}) | | Volumen específico Vapor ⁸ | Velocidad máxima |
|----------------------------|---------------------------------|--------|--|---------------------|
| | kg/h | lb/h | | |
| Tubería de vapor a 60 psig | | | ft ³ /lb | ft/min |
| Distribuidor hacia RB-101 | 360 | 793,8 | 5,814 | 6000 |
| Distribuidor hacia RB-201 | 450 | 992,25 | 5,814 | 6000 |
| Distribuidor hacia RB-301 | 700 | 1543,5 | 5,814 | 6000 |
| Tubería auxiliar | 304 | 670,32 | 5,814 | 6000 |

Fuente: Autor

Dando como resultados, los valores ilustrados en la tabla 16:

Tabla 16. Tabla de tuberías para los procesos

| | Diámetro interno calculado (mm) | Número de cédula | Diámetro interno (mm) | Diámetro nominal (in) | Espesor (mm) |
|------------------|------------------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| RB-101 | 38,94 | 40 | 40,9 | 1 ½ | 3,68 |
| RB-201 | 43,54 | 40 | 52,5 | 2 | 3,91 |
| RB-301 | 54,3 | 40 | 52,5 | 2 | 3,91 |
| Tubería auxiliar | 35,79 | 40 | 40,9 | 1 ½ | 3,68 |

Fuente: Autor

⁸ Consultar las tablas de vapor para obtener el valor adecuado.

Con el mismo procedimiento y utilizando las ecuaciones 11 y 12, calculamos el espesor mínimo necesario de las tuberías para los procesos de calentamiento, obteniendo como resultados los valores resumido en la tabla 17.

Material: ASTM A 53 Gr. B, sin costura (recomendación Norma ASTM)

Presión interna de la tubería: 60 psig

Presión de diseño (P): 90 psig

Temperatura de trabajo: 150 °C (302°F)

Tipo de construcción: no soldada

Esfuerzo permisible (S): 1500 lb/in² (ver anexo B VII)

Eficiencia de unión por soldadura (E): 1 (ver anexo B VII)

Coefficiente de temperatura (Y): 0,4 (ver anexo B VIII)

Espesor por corrosión⁹ (C): 0,5 mm (0,02 in)

Tabla 17. Espesores mínimos para las tuberías

| Tubería (in) | Diámetro exterior (in) | t_{min} (in) | t_{nom} (in) | t_{nom} (mm) |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 1/2 | 1,900 | 0,0238 | 0,027 | 0,69 |
| 2 | 2,375 | 0,0247 | 0,0283 | 0,718 |
| 2 | 2,375 | 0,0247 | 0,0283 | 0,718 |

Fuente: Autor

Por lo tanto se utilizará una tubería de acero al carbono SCH 40, ya que satisface las necesidades de espesor y por facilidad de adquisición en el mercado.

3.5 Dimensionamiento del cabezal de distribución de vapor

Como es conocido, cuando al vapor se le reduce la presión su volumen específico aumenta, necesitando una tubería de mayor diámetro.

⁹ Recomendación norma ASME B31.1-2004, página 18

3.5.1 *Cálculo del diámetro del distribuidor.* Para determinar el diámetro adecuado para el distribuidor se maneja el criterio de dos veces el área de la tubería de entrada. Este criterio es utilizado como una buena práctica de ingeniería y está recomendado por la empresa Watson McDaniel.

3.5.1.1 *Cálculo por el método de “dos veces el área”.* Dicho criterio de cálculo utiliza el área equivalente superficial externa de la tubería de ingreso al distribuidor de vapor y la multiplica por dos.

Para calcular el área de la tubería de ingreso utilizamos la ecuación 13.

$$A = \pi D^2 / 4 \quad (13)$$

Dando como resultado los valores resumidos en la tabla 18.

Tabla 18. Cálculo del área del distribuidor

| Tubería | Diámetro nominal (in) | Número de cédula | Diámetro externo (in) | Factor a multiplicar | Área (in²) |
|------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Ingreso de vapor | 3 | 40 | 3,5 | 2 | 19,24 |
| Opción A | 4 | 40 | 4,5 | 1 | 15,90 |
| Opción B | 6 | 40 | 6,625 | 1 | 34,47 |

Fuente: Autor

Se ha tomado las dimensiones de tubos de 4 y 6 pulgadas porque son los existentes en la fábrica, obteniendo como resultado un diámetro de 6 pulgadas optimas para el distribuidor de vapor.

3.5.2 *Cálculo de la longitud del distribuidor.* Para determinar la longitud ideal del distribuidor de vapor, se consideró el número de tuberías que extraen vapor para el abastecimiento del recurso energético, una tubería auxiliar y sus futuras ampliaciones.

Se ha estimado una distancia prudente entre tuberías, para facilidad de instalación, manipulación de accesorios y mantenimiento.

Los valores del distribuidor de vapor se pueden resumir en la tabla 19.

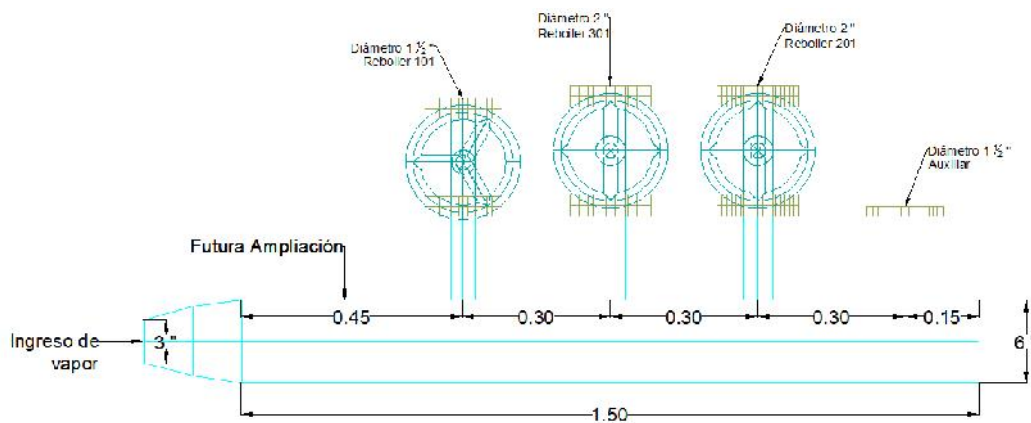
Tabla 19. Distancias del distribuidor de vapor

| Dimensiones del distribuidor de vapor | | | | |
|---------------------------------------|---|--------------|----------------------|--------------------|
| Ítem | Descripción | Longitud (m) | Factor a multiplicar | Longitud total (m) |
| 1 | Distancia entre ejes de tuberías de alimentación | 0,3 | 3 | 0,9 |
| 2 | Distancia entre ejes de tuberías y pared del distribuidor | 0,15 | 2 | 0,30 |
| 3 | Distancia para futura extracción | 0,30 | 1 | 0,30 |
| 4 | Longitud del distribuidor | | | 1,5 |

Fuente: Autor

Dando como resultado la configuración que se observa en la figura 33.

Figura 33. Distribuidor de vapor



3.6 Cálculo del espesor de aislante térmico para la tubería de vapor

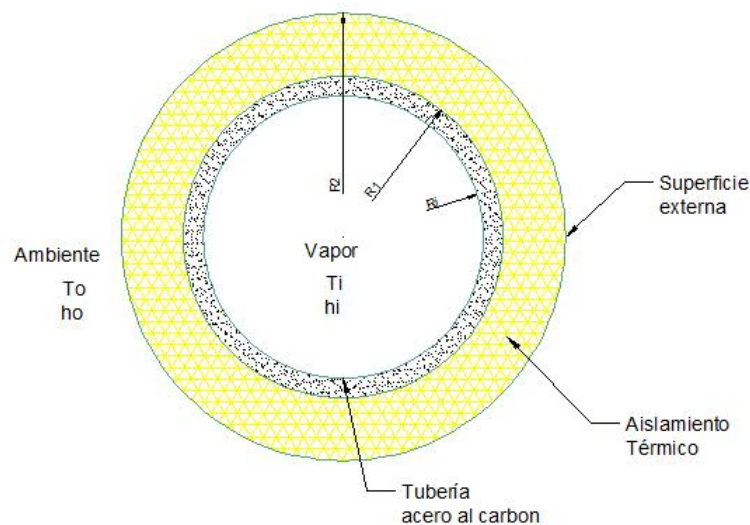
El objetivo de aislar las tuberías de vapor es reducir la transferencia de calor al ambiente de trabajo, evitando pérdidas de calor y generando ahorros importantes en la industria; y más importante minimizar el riesgo de quemaduras del personal.

Se va a realizar el cálculo para la tubería cuyo diámetro nominal es de 3 pulgadas de SCH 40, tubería calculada para el transporte del vapor.

El espesor de aislante de fibra de vidrio mínimo recomendado para una tubería de 3 pulgadas, es de 50 mm (ver anexo B III), cuyo valor va a ser comprobado con los cálculos pertinentes.

La configuración de la tubería se muestra en la figura 34.

Figura 34. Configuración de la tubería



Fuente: Autor

Antes de calcular el espesor del aislante térmico, primero debemos determinar el coeficiente de convección dentro de la tubería y del medio ambiente.

3.6.1 Cálculo de los coeficientes de convección

3.6.1.1 *Coeficiente de convección entre el vapor y la superficie interna de la tubería.* El coeficiente de convección depende de las condiciones del fluido como temperatura, presión y velocidad, para lo cual utilizamos la ecuación:

$$h_{\text{conv}} = \text{Nu} * k_{\text{fluido}} / D_i \quad (14)$$

Dónde:

h_{conv} : Coeficiente de convección [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]

N_u : Número de Nusselt [adimensional]

k_{fluido} : Conductividad térmica del vapor [W/m.°C]

D_i = Diámetro interno de la tubería [m]

Entonces debemos calcular el número de Nusselt con las propiedades del vapor a la temperatura de saturación, es decir para 190 °C.

Las propiedades del vapor a dicha temperatura se resumen en la tabla 20.

Tabla 20. Propiedades del vapor a 190 °C

| | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|----------|
| Diámetro interno de la tubería | 77,9 | mm | 0,0779 | m |
| Área interna de la tubería | 0,004766118 | m ² | | |
| Diámetro externo de la tubería | 0,0889 | m | | |
| Área externa de la tubería | 0,006207181 | m ² | | |
| Flujo másico de vapor | 1815 | kg/h | 0,50416667 | kg/s |
| Volumen específico () | 0,15 | m ³ /kg | | |
| Calor específico (cp) | 1974 | J/Kg °C | 1,974 | kJ/kg °K |
| Viscosidad dinámica (μ) | 1,54E-05 | Kg/ms | N.s/m ² | |
| Conductividad térmica (k) | 3,24E-02 | W/m °C | | |
| Temperatura | 190 | °C | | |
| Densidad () | 0,4768 | kg/m ³ | | |

Fuente: Tablas de vapor

Sabemos que el número de Nusselt (N_u) está en función del número de Reynolds (Re) y el número de Prandtl (Pr) que se relacionan con la ecuación 15.

$$N_u = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,4} \quad (15)$$

Por lo tanto para encontrar el número de Reynolds, debemos conocer la velocidad del fluido mediante la ecuación 3.9, entonces se obtiene:

$$V = (0,5041 \text{ kg/s}) * (0,15 \text{ m}^3/\text{kg}) / 0,004766 \text{ m}^2$$

$$V = 15,867 \text{ m/s}$$

Utilizando la ecuación 3, obtenemos el número de Reynolds

$$Re = 77,9 * 15,867 * 0,4768/1000 * 1,54E^{-05}$$

$$Re = 3,83 \times 10^4$$

Para determinar el número de Prandtl utilizamos la ecuación 16.

$$Pr = \mu * c_p/k \quad (16)$$

Por lo tanto tenemos:

$$Pr = 1,54 \times 10^{-3} (\text{kg/m.s}) * 1974 (\text{J/kg.}^\circ\text{C}) / 3,24 \times 10^{-2} (\text{W/m.}^\circ\text{C})$$

$$Pr = 0,9376$$

Mediante el uso de la ecuación 15 podemos encontrar el número de Nusselt, teniendo así:

$$N_U = 0,023 * (3,83 \times 10^4)^{0,8} * (0,9376)^{0,4}$$

$$N_U = 104,11$$

Como ya conocemos todas las variables de la ecuación 14, determinamos el coeficiente de convección dentro de la tubería.

$$h_{\text{conv}} = 104,11 * 3,24 \times 10^{-2} (\text{W/m.}^\circ\text{C}) / 0,0779 (\text{m})$$

$$h_{\text{conv}} = 43,2478 [\text{W/m}^2.^\circ\text{C}]$$

3.6.1.2 *Coeficiente de convección entre la tubería y el medio ambiente.* La norma de seguridad de aislamiento térmico dice que la temperatura segura en una línea de vapor debe estar por debajo de los 60 °C.

Por recomendación de catálogos se consideró que la temperatura de la superficie sea de 40 °C, dato importante que nos servirá para calcular el coeficiente de convección del medio ambiente.

Para realizar este cálculo vamos a suponer que la temperatura en la superficie de la tubería de 3 pulgadas se encuentra a 40 °C, para facilitar en algo los cálculos. Como se dijo anteriormente, el coeficiente de convección depende de varios factores entre ellos de la temperatura, entonces las condiciones de operación se resumen en la tabla 21.

Tabla 21. Datos para calcular el coeficiente de convección

| | | |
|--|----------|----------------------------------|
| Temperatura ambiente (Ta) | 25 | °C |
| Temperatura externa de la tubería (Ts) | 40 | °C |
| Coeficiente de Stefan-Boltzman () | 5,67E-08 | W/m ² °K ⁴ |
| Emisividad chapa de acero () | 0,75 | |
| Conductividad térmica del acero (k) | 42 | W/m°C |
| Diámetro externo de la tubería (De) | 0,0889 | m |

Fuente: Autor

Por lo tanto determinaremos el coeficiente por convección mediante la ecuación 17.

$$h_{\text{convección}} = 1,32 * [(T_s - T_a)/D]^{0,25} \quad (17)$$

$$h_{\text{convección}} = 1,32 * [(40 - 25)/0,0889]^{0,25}$$

$$h_{\text{convección}} = 4,7574 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

Ahora se calcula el coeficiente por radiación con la utilización de la ecuación 18.

$$h_{\text{radiación}} = \varepsilon * \sigma * (T_s^4 - T_a^4) / T_s - T_a \quad (18)$$

Dónde:

: Emisividad de la chapa de acero

: Coeficiente de Stefan-Boltzman [W/m² °K⁴]

Ts: Temperatura de la superficie [°K]

Ta: Temperatura del ambiente [°K]

Reemplazando los valores en la ecuación 18, obtenemos:

$$h_r = 0,75 * 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}^4 * ((40 + 273)^4 - (25 + 273)^4) \text{°K}^4 / (40 - 25) \text{°C}$$

$$h_{\text{radiación}} = 4,85 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

El coeficiente de convección del medio ambiente resulta de la suma de los coeficientes de convección y radiación antes calculados.

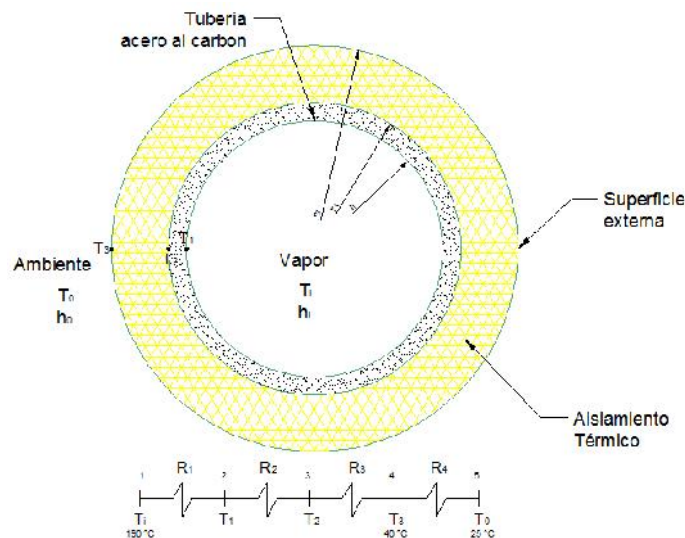
$$h_{\text{conv_amb}} = h_{\text{convección}} + h_{\text{radiación}} \quad (19)$$

$$h_{\text{conv_amb}} = 4,7574 + 4,85$$

$$h_{\text{conv_amb}} = 9,61 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

3.6.2 *Cálculo del espesor de aislante de la tubería principal de vapor.* Con los datos obtenidos anteriormente y con la ayuda de la transferencia de calor podemos determinar el espesor del aislante técnico para las tuberías de conducción de vapor de agua. La configuración de la tubería y de las resistencias térmicas se visualiza en la figura 35.

Figura 35. Configuración tubería de vapor



Fuente: Autor

El material aislante seleccionado para dicha aplicación es la cañuela de fibra de vidrio prefabricada en forma de media caña como se observa en la figura 36.

Figura 36. Cañuela de fibra de vidrio



Fuente: Ref. [54]

Las condiciones de operación se resumen en la tabla 22.

Tabla 22. Parámetros de operación de la tubería

| | | |
|---|---------|---------------------|
| Temperatura del ambiente (T_o) | 25 | °C |
| Coeficiente de convección del ambiente (h_o) | 9,6102 | W/m ² °C |
| Temperatura de vapor (T_i) | 190 | °C |
| Coeficiente de convección del vapor (h_i) | 43,2478 | W/m ² °C |
| Diámetro nominal de la tubería | 3 | in |
| Diámetro interno de la tubería (D_i) | 0,0779 | m |
| Diámetro externo de la tubería (D_e) | 0,0889 | m |
| Radio interno (r_i) | 0,03895 | m |
| Radio externo (r_1) | 0,04445 | m |
| Longitud | 1 | m |
| Área de transferencia externa del tubo (A_o) | 0,2793 | $P_i * D_e * L$ |
| Área de transferencia interna del tubo (A_i) | 0,24473 | $P_i * D_i * L$ |
| Conductividad térmica del acero(k_{acero}) | 42 | W/m °C |
| Conductividad térmica del aislante($k_{fibra\ de\ vidrio}$) | 0,034 | W/m °C |
| Temperatura de la superficie externa (T_s) | 40 | °C |

Fuente: Autor

Las resistencias térmicas observadas en la figura 35 se pueden calcular por las siguientes ecuaciones:

$$R_1 = 1/A_i * h_i \quad (20)$$

$$R_1 = 1/0,24473(m^2) * 43,2478(W/m^2. ^\circ C)$$

$$R_1 = 0,09448 [^\circ C/W]$$

$$R_2 = \ln(r_1/r_i)/2 * \pi * k_{acero} * L \quad (21)$$

$$R_2 = \ln(0,04445/0,03895)/2 * 3,1416 * 42(W/m. ^\circ C) * 1(m)$$

$$R_2 = 0,0005005 [^\circ C/W]$$

$$R_4 = 1/A_o * h_o \quad (22)$$

$$R_4 = 1/0,2793(m^2) * 9,6102 (W/m^2. ^\circ C)$$

$$R_4 = 0,3725 [^\circ C/W]$$

$$R_3 = \ln(r_2/r_1)/2 * \pi * k_{aislante} * L \quad (23)$$

Para determinar la resistencia 3, primero debemos conocer el calor transmitido a través de la tubería. Sabemos que el calor es constante en todos los puntos del diagrama de resistencias, ver figura 35, por lo que podemos calcular el calor con la ecuación 24.

$$Q = (T_i - T_o)/R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = (T_s - T_o)/R_4 \quad (24)$$

$$Q = (40 - 25)^\circ C/0,3725 (^\circ C/W)$$

$$Q = 42,95 [W]$$

Por lo tanto reemplazando los valores en la ecuación 24, podemos encontrar el valor de la resistencia 3.

$$42,95 = (190 - 25)^\circ C/0,09448 + 0,0005005 + \mathbf{R_3} + 0,3725$$

$$R_3 = 3,40 \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

Utilizando la ecuación 3.23 podemos encontrar el radio del aislante de fibra de vidrio.

$$3,4 \text{ (}^\circ\text{C/W)} = (\ln(r_2/0,04445))/2 * 3,1416 * 0,034 \text{ (W/m }^\circ\text{C)} * 1 \text{ (m)}$$

$$r_2 = 0,09185 \text{ [m]}$$

Para encontrar el espesor utilizamos la siguiente ecuación:

$$e_{\text{aislante}} = r_2 - r_1 \quad (25)$$

$$e_{\text{aislante}} = 0,09185 \text{ [m]} - 0,04445 \text{ [m]}$$

$$e_{\text{aislante}} = 0,04740 \text{ [m]}$$

$$e_{\text{aislante}} = 1,866 \text{ [in]}$$

$$e_{\text{aislante}} = 47,40 \text{ [mm]}$$

Calculado el espesor del aislante y al compararlo con la recomendación dada, verificamos que el espesor es el adecuado. Por lo tanto se colocará cañuela de 2 pulgadas de espesor.

3.6.3 Cálculo del espesor de aislante para las tuberías de distribución de vapor.

Siguiendo el mismo procedimiento para calcular el espesor del aislante para la tubería principal de vapor, calculamos el espesor de aislante para las tuberías de distribución de vapor hacia los reboilers, cuyos valores calculados se muestran en la tabla 23. Las condiciones de servicio se resumen en el anexo A IV.

Tabla 23. Espesor del aislante para las tuberías de distribución de vapor

| Nombre | Símbolo | Unidades | Tubería RB-101 | Tubería RB-201 | Tubería RB-301 |
|----------------------------------|------------------|----------|----------------|----------------|----------------|
| Espesor del aislante calculado | e | in | 1,21 | 1,317 | 1,33 |
| Espesor del aislante calculado | e | mm | 30,98 | 33,45 | 33,86 |
| Espesor del aislante recomendado | e _{rec} | mm | 30 | 40 | 40 |

Fuente: Autor

Por lo cual se decidió instalar cañuelas en forma de media caña, de espesor de 1 ½ pulgadas.

3.7 Dimensionamiento de la estación reguladora de presión de vapor

3.7.1 *Selección de la válvula reguladora de presión.* El vapor producido desde la sala de calderos posee una presión de 175 psig y a una temperatura de 190°C, para lo cual se necesita reducir dicha presión a 60 psig y una temperatura de 150 °C, necesarios para el proceso.

Para seleccionar una válvula reguladora de presión se necesita los datos resumidos en la tabla 24.

Tabla 24. Datos para seleccionar válvula reguladora de presión

| Datos | | |
|----------------------------------|------|---------|
| Presión de entrada de la válvula | 175 | psig |
| Presión de salida de la válvula | 60 | psig |
| Flujo de calor | 4000 | lb/hora |

Fuente: Autor

Con los datos de la tabla anterior seleccionamos una válvula reguladora con las siguientes características¹⁰. (Ver anexo B XIII)

Marca de la válvula: Watson McDaniel

Serie: Regulador HSP

Diámetro: 1 ¼ pulgadas

¹⁰ Uso del catálogo Watson McDaniel, página 150

3.8 Dimensionamiento y selección de trampas de vapor para la tubería de vapor principal

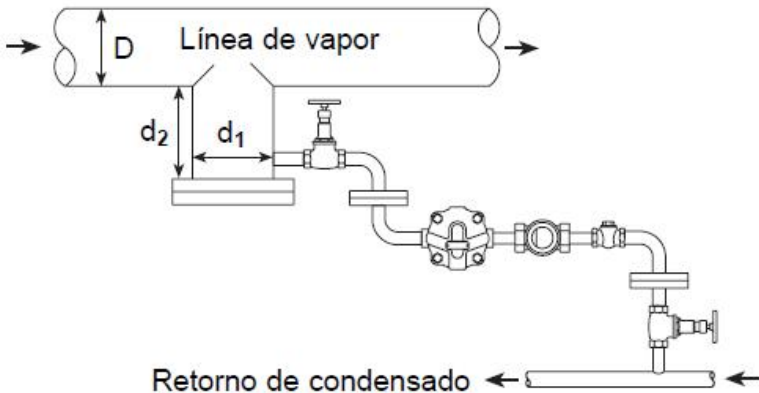
3.8.1 *Dimensionamiento de las piernas colectoras de condensado.* Como las tuberías de vapor transporta además de éste, gotas de agua en suspensión, una cierta masa de condensado depositada en las paredes de la tubería y aire.

Es necesario dimensionar correctamente las pierna colectoras de condensado para purgarlas con facilidad, para lo cual nos hemos basado en las recomendaciones de la empresa Spirax Sarco.

En la tabla 25 se muestra las dimensiones recomendadas para los pozos de goteo para las líneas de vapor:

Tabla 25. Dimensiones recomendadas para los pozos de goteo

| Diámetro de la línea - D | Diámetro del pozo - d_1 | Profundidad del pozo - d_2 |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Hasta 100 mm | $d_1 = D$ | Mínimo $d_2 = 100$ mm |
| 125 - 200 mm | $d_1 = 100$ mm | Mínimo $d_2 = 150$ mm |
| 250 mm y superior | $d_1 = D / 2$ | Mínimo $d_2 = D$ |



Fuente: Ref. [55]

En base a la tabla 25 que nos indica las dimensiones de la tubería procedemos a dimensionar nuestro pozo de goteo.

Diámetro tubería principal (D): 88,9 mm (3 pulgadas)

Diámetro del pozo (d_1): 88,9 mm (3 pulgadas)

Profundidad del pozo (d_2): 100 mm (recomendado)

3.8.2 *Selección de las trampas de vapor para las piernas colectoras.* Por recomendaciones técnicas el drenaje de las líneas principales y de distribución de vapor se debe colocar cada 200 pies (60,98 metros) para tramos rectos de tubería.

Por lo tanto como la tubería principal tiene una longitud de 492 pies (150 metros) se ha decidido colocar dos pozos de goteo una cada 200 pies de longitud.

Para poder seleccionar apropiadamente las trampas de vapor necesitamos conocer la cantidad de condensado generado en nuestra tubería de vapor, para lo cual utilizamos la tabla de generación de condensado¹¹ en libras por hora.

Teniendo como datos:

- Tubería de vapor: 3 pulgadas
- Presión de vapor: 175 psig

Dando como resultado:

$$\text{Carga}_{\text{condensado}} = 23 \text{ lb/h} / 100\text{ft}$$

Como tenemos 200 pies de longitud, la carga de condensado real será:

$$\text{Carga}_{\text{condensado}} = 46 \text{ lb/h}$$

Para determinar el mejor tipo de trampa de vapor utilizamos la tabla 26.

¹¹ Uso del catálogo Watson McDaniel, página 167

Tabla 26. Guía de selección para trampas de vapor

A - Mejor elección, B - Alternativa aceptable. ³(con tubería de enfriamiento), ⁵(disco eliminador de aire)

| | Boya cerrada termostático | Boya cerrada FT-C | Termodinámico | Presión equilibrada | Bimetálico | Expansión líquida | Cubeta invertida |
|---|------------------------------|----------------------|----------------|------------------------|------------|----------------------|---------------------|
| Tramos horizontales | B | | A | | | | B |
| Separadores | A | | B | | | | B |
| Finales de línea | B | | A ¹ | | | | B ¹ |
| Drenaje para paradas (protección contra heladas) | | | | B ³ | B | A | |
| Drenaje de calentadores | A | | B ⁶ | | | | B |

Fuente: Ref. [28]

Como mejor alternativa se observa la trampa termodinámica, pero por facilidad de adquisición utilizaremos la trampa de vapor de cubeta o balde invertido que también es aceptable para el proceso.

Como cada trampa de vapor posee su factor de seguridad y para este caso es de 2 la carga de condensado para la selección será:

$$\text{Carga}_{\text{condensado para la selección}} = 46 \text{ lb/h} * 2$$

$$\text{Carga}_{\text{condensado para la selección}} = 92 \text{ lb/h}$$

Como necesitamos saber el diferencial de presión para la selección de trampas utilizamos la ecuación 26.

$$\text{Diferencial de presión} = \text{Presión de trabajo} - \text{Presión de descarga} \quad (26)$$

Dónde:

Presión de trabajo: 175 psig

Presión de descarga: 0 psig

Obteniendo como resultado:

$$\text{Diferencial de presión} = 175 \text{ psig}$$

Con la carga de condensado y la presión diferencial de vapor, seleccionamos la trampa de vapor. Para lo cual consultamos el catálogo técnico de Watson McDaniel obteniendo una trampa de vapor de balde invertido de las siguientes características:

Fabricante: Watson McDaniel

Modelo: 1032

Presión máxima de operación: 250 psig

Temperatura máxima de operación: 450 °F

Presión máxima admisible: 250 psig

Diámetro de conexiones para tubería: ½ in.

Conexión roscada NPT¹²

3.8.3 *Selección de trampas de vapor para el distribuidor.* Para estimar la cantidad de condensado que se forma en el distribuidor de vapor se puede utilizar la siguiente relación, obteniéndose:

$$\text{Carga}_{\text{condensado}} = \frac{\text{Factor de seguridad} * \text{flujo de calor} * \# \text{alimentaciones}}{\text{arrastre}} \quad (27)$$

Dónde:

Factor de seguridad: 1,5 (Recomendado [62])

Flujo de calor: 4000 lb/h

Número de alimentaciones: 1

Arrastre: 0,1 (10%) (Recomendado [62])¹³

Utilizando la ecuación 27 obtenemos:

¹² NPT (acrónimo del inglés National Pipe Thread, (rosca nacional de tubos), es una norma técnica estadounidense que se aplica para la estandarización del roscado de los elementos de conexión.

¹³ Manual Armstrong [62]

$$\text{Carga condensado} = 600 \text{ [lb/h]}$$

Para determinar la presión diferencial del sistema utilizamos la ecuación 26, sabiendo que la presión de trabajo es de 60 psig, obteniendo como resultado:

$$\text{Diferencial de presión} = 60 \text{ psig} - 0 \text{ psig}$$

$$\text{Diferencial de presión} = 60 \text{ [psig]}$$

Con la carga de condensado y la presión diferencial de vapor, seleccionamos la trampa de vapor. Para lo cual consultamos el catálogo técnico de Watson McDaniel obteniendo una trampa de vapor del tipo de balde invertido de las siguientes características:

- Fabricante: Watson McDaniel
- Modelo: 1032
- Presión máxima de operación: 70 psig
- Temperatura máxima de operación: 450 °F
- Presión máxima admisible: 250 psig
- Diámetro de conexiones para tubería: ½ in.
- Conexión roscada NPT

3.9 Cálculo de la carga de condensado para los equipos de consumo de vapor

Los equipos que consumen vapor de agua, son calentadores llamados Reboilers, cuya función principal es elevar la temperatura del producto para poder así; evaporar y separar el componente más volátil en este caso el metanol.

Se posee tres equipos de recalentamiento designados como: RB-101, RB-201 Y RB-301.

3.9.1 *Equipo de calentamiento_ Reboiler-101.* Para calcular en forma muy aproximada de la cantidad de condensado que se forma al realizar el proceso de calentamiento se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$CH = A * U * \Delta T_{ml} / h_{fg} \quad (28)$$

Dónde:

CH: Carga de condensado [lb/h]

A: Área de transferencia de calor [ft²]

U: Coeficiente de transferencia de calor [Btu/h.ft².°F] [65]

ΔT_{ml} : Diferencia de temperatura media logarítmica [°F]

h_{fg} : Calor latente de evaporación [Btu/lb]

Para encontrar la diferencia de temperatura media logarítmica, utilizamos la ecuación 29.

$$\Delta T_{ml} = \{(T_v - T_{ff}) - (T_v - T_{fc})\} / \ln\{(T_v - T_{ff}) / (T_v - T_{fc})\} \quad (29)$$

Dónde:

T_v : Temperatura del vapor [°F]

T_{ff} : Temperatura de ingreso del fluido [°F]

T_{fc} : Temperatura de salida del fluido [°F]

Por lo tanto utilizando las ecuaciones 28 y 29, con lo datos de la tabla 27, podemos obtener la cantidad de condesado que se produce en el Reboiler-101.

Tabla 27. Datos del Reboiler-101

| | | | | |
|--|-------|--------------------------|--------|-----------------|
| Área de transferencia de calor (A) | 35 | m ² | 376,54 | ft ² |
| Temperatura de vapor (T _v) | 150 | °C | 238 | °F |
| Presión de vapor (P _v) | 60 | psig | | |
| Temperatura de ingreso del fluido (T _{ff}) | 25 | °C | 13 | °F |
| Temperatura de salida del fluido (T _{fc}) | 100,3 | °C | 148,54 | °F |
| Coeficiente de transferencia de calor (U) | 10 | Btu/h ft ² °F | | |
| Calor latente del vapor (h _{fg}) | 904,3 | Btu/lb | | |

Fuente: Autor

Reemplazando los valores:

$$\Delta T_{ml} = \{(238 - 13) - (238 - 148,54)\} / \ln\{(238 - 13)/(238 - 148,5)\}$$

$$\Delta T_{ml} = 146,95 \text{ °F}$$

$$CH = 376,54[\text{ft}^2] * 10[\text{Btu/h. ft}^2. \text{°F}] * 146,95 [\text{°F}]/904,3 [\text{Btu/lb}]$$

$$CH = 611,92 [\text{lb/h}]$$

3.9.2 *Equipos de calentamiento_ Reboiler-201 y Reboiler-301.* Para determinar la carga de condensado para los calentadores faltantes utilizamos el mismo procedimiento anterior obteniendo los siguientes resultados:

3.9.2.1 *Reboiler-201*

Tabla 28. Datos y cálculo de carga de condensado Reboiler-201

| | | | | |
|--|---------------|--------------------------|--------|-----------------|
| Área de transferencia de calor (A) | 35 | m ² | 376,54 | ft ² |
| Temperatura de vapor (T _v) | 180 | °C | 292 | °F |
| Presión de vapor (P _v) | 60 | psig | | |
| Temperatura de ingreso del fluido (T _{ff}) | 25 | °C | 13 | °F |
| Temperatura de salida del fluido (T _{fc}) | 83,7 | °C | 118,66 | °F |
| Coeficiente de transferencia de calor (U) | 10 | BTU/h ft ² °F | | |
| Calor latente del vapor (h _{fg}) | 904,3 | BTU/lb | | |
| T _{ml} | 221,9949382 | °F | | |
| CÁLCULO CARGA DE CONDENSADO | | | | |
| CH= | 924,37 | lb/h | | |

Fuente: Autor

3.9.2.2 Reboiler-301

Tabla 29. Datos y cálculo de carga de condensado Reboiler-301

| | | | | |
|--|-------------|--------------------------|--------|-----------------|
| Área de transferencia de calor (A) | 50 | m ² | 537,92 | ft ² |
| Temperatura de vapor (T _v) | 180 | °C | 292 | °F |
| Presión de vapor (P _v) | 60 | psig | | |
| Temperatura de ingreso del fluido (T _{ff}) | 25 | °C | 13 | °F |
| Temperatura de salida del fluido (T _{fc}) | 80 | °C | 112 | °F |
| Coefficiente de transferencia de calor (U) | 10 | BTU/h ft ² °F | | |
| Calor latente del vapor (h _{fg}) | 904,3 | BTU/lb | | |
| Tml | 225,8959181 | °F | | |
| CÁLCULO CARGA DE CONDENSADO | | | | |
| CH= | 1343,73 | lb/h | | |

Fuente: Autor

3.9.3 *Dimensionamiento de la tubería de retorno de condensado.* Cuando se trate de dimensionar una tubería de retorno de condensado, se debe tener en consideración que porcentaje del espacio físico de la tubería está ocupado por vapor y cuanta por líquido.

Este cambio de fase se da debido a que el líquido del condensado y vapor de ingreso antes de la entrada de la trampa de vapor se encuentran a la misma presión del sistema, y el condensado al ser descargado por la trampa sufre una caída súbita de presión, liberando calor sensible y transformándolo en calor latente, produciéndose un cambio de fase de líquido a vapor llamado vapor flash, que viaja conjuntamente con el líquido hacia el punto de recuperación de condensado.

A continuación se da una guía para poder calcular el porcentaje de vapor presente.

3.9.3.1 *Porcentaje de vapor flash presente en el condensado.* El porcentaje de vapor flash se puede estimar con la ecuación 30

$$\% \text{Vapor flash} = h_{f(e)} - h_{f(s)} / h_{fg(s)} \quad (30)$$

Dónde¹⁴:

¹⁴ Consultar tablas de vapor para obtener los datos

$h_{f(e)}$: Entalpía del líquido a la presión de trabajo [Btu/lb], en este caso a 60 psig.

$h_{f(s)}$: Entalpía del líquido a la presión de salida [Btu/lb], en este caso a 0 psig.

h_{fg} : Calor latente de evaporación [Btu/lb], en este caso a 0 psig.

Reemplazando los valores obtenemos:

$$\%_{\text{Vapor flash}} = (277,6 - 180,17/970,3) * 100$$

$$\%_{\text{Vapor flash}} = 10,04\%$$

3.9.3.2 *Cálculo del flujo de vapor flash*. Una vez obtenido el porcentaje de vapor flash presente en la tubería de retorno de condensado procedemos a determinar el flujo en libras de vapor por hora, lo que debemos hacer es multiplicar el porcentaje calculado por el flujo de condensado.

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 30. Flujo de vapor flash

| Flujo de condensado (lb/h) | Flujo de vapor flash (lb/h) |
|---------------------------------------|--|
| 611,92 | 61,437 |
| 924,37 | 92,807 |
| 1343,73 | 134,910 |

Fuente: Autor

Utilizando el mismo procedimiento de cálculo de la tubería principal de vapor, podemos encontrar las dimensiones de la tubería de retorno de condensado. La diferencia entre la tubería de vapor y la tubería de retorno de condensado es la velocidad y la presión manométrica, que en este caso se encuentra a 0 psig y la velocidad recomendada es de 4000 ft/min. Las condiciones se resumen en la tabla 31.

Tabla 31. Valores para determinar el diámetro de tubería para el retorno de condensado

| Datos | Flujo de vapor flash ¹⁵ (lb/h) | Volumen específico vapor ¹⁵ ft ³ /lb | Velocidad máxima ft/min |
|------------------|--|---|----------------------------|
| Tubería a 0 psig | lb/h | ft ³ /lb | ft/min |
| RB-101 | 61,43 | 26,799 | 4000 |
| RB-201 | 92,80 | 26,799 | 4000 |
| RB-301 | 134,91 | 26,799 | 4000 |

Fuente: Autor

Utilizando las ecuaciones 9 y 10, con los datos de la tabla 31, obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 32. Diámetros de las tuberías para retorno de condensado

| Equipo | Diámetro interno calculado (mm) | Número de cédula | Diámetro interno (mm) | Diámetro nominal (in) | Espesor (mm) |
|--------|---------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| RB-101 | 28,48 | 40 | 35,1 | 1 ¼ | 3,56 |
| RB-201 | 35,01 | 40 | 35,1 | 1 ¼ | 3,56 |
| RB-301 | 42,21 | 40 | 52,5 | 2 | 3,91 |

Fuente: Autor

3.9.4 *Selección de trampas de vapor para los equipos de calentamiento.* Como ya se calculó la carga de condensado de cada equipo, procedemos a seleccionar las trampas de vapor más óptimas para el proceso.

Por recomendación general de la empresa Watson McDaniel se puede utilizar trampas de vapor de flotador y termostato, por su excelente capacidad de manejo de aire y condensado, estas trampas de vapor poseen un factor de seguridad de 2 necesario para la adecuada selección.

Obteniendo los siguientes resultados:

¹⁵ Consultar las tablas de vapor para obtener el valor

Tabla 33. Carga de condensado para la selección de trampas de vapor

| Equipo | Designación | Carga de condensado [lb/h] | Factor de seguridad | Carga de Condensado total [lb/h] | Diferencial de presión [psig] |
|---------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|---|--------------------------------------|
| Reboiler-101 | RB-101 | 611,92 | 2 | 1223,84 | 60 |
| Reboiler-201 | RB-201 | 924,37 | 2 | 1848,74 | 60 |
| Reboiler-301 | RB-301 | 1343,73 | 2 | 2687,46 | 60 |

Fuente: Autor

Como la descarga del condensado es a un tanque a presión atmosférica, podemos encontrar la presión diferencial utilizando la ecuación 26. Valores que se encuentran en la tabla 33.

Con los valores de carga de condensado total y el diferencial de presión procedemos a seleccionar las trampas de vapor adecuadas, dando como resultado:

Tabla 34. Trampas de vapor seleccionadas

| Equipo | Designación | Trampa | Serie | Medida [in] |
|---------------|--------------------|-----------------------|--------------|--------------------|
| Reboiler-101 | RB-101 | Flotador y Termostato | FTT-65 | 1 |
| Reboiler-201 | RB-201 | Flotador y Termostato | FTT-65 | 1 |
| Reboiler-301 | RB-301 | Flotador y Termostato | FTT-65 | 1 |

Fuente: Autor

Las características de las trampas de vapor instaladas son (Ver Anexo B XVII):

Fabricante: Watson McDaniel

Modelo: FTT

Conexiones: NPT

Material del cuerpo: Hierro dúctil

PMO presión máxima de operación: 65 psig

3.9.5 Cálculo del espesor de aislante para las tuberías de retorno de condensado.

Luego que el vapor cumple su función de transferencia calor se condensa. Dicho condensado posee aún una temperatura elevada que está alrededor de los 100 °C, dato

obtenido al realizar las respectivas medidas en sistemas similares. Por lo que se asumió dicho valor para los cálculos correspondientes.

El objetivo de aislar la tubería de retorno de condensado es conservar en lo posible el calor latente contenido en dicho fluido, por lo cual se realiza el mismo procedimiento utilizado en el ítem 3.6.

Por lo tanto procedemos a calcular el espesor del aislante con las consideraciones de la tabla 35.

Tabla 35. Condiciones de funcionamiento tubería de condensado

| Parámetros | Simbología | Unidades | Tubería de condensado |
|------------------------------------|------------|----------------------|-----------------------|
| Diámetro nominal | Dn | in | 2 |
| Diámetro externo | De | mm | 60,3 |
| Diámetro interno | Di | mm | 52,5 |
| Área interna | Ai | m ² | 0,1649 |
| Área externa | A0 | m ² | 0,1894 |
| Temperatura de condensado | Ti | °C | 100 |
| Coeficiente de convección interior | hi | W/m ² .°C | 769,78 |
| Coeficiente de convección exterior | ho | W/m ² .°C | 10,09 |

Fuente: Autor

Realizando los demás cálculos para encontrar las variables (ver anexo A V), obtenemos los valores, el cálculo se lo realizó para la tubería de mayor diámetro (2 pulgadas).

$$Q = 28,50 \text{ [W]}$$

Por lo tanto reemplazando los valores en la ecuación 24, podemos encontrar el valor de la resistencia 3.

$$30,59 = (100 - 24)^{\circ}\text{C}/0,0078 + 0,00036 + R_3 + 0,5262$$

$$R_3 = 2,096 \text{ [}^{\circ}\text{C/W]}$$

Utilizando la ecuación 23 podemos encontrar el radio del aislante de fibra de vidrio.

$$1,953 \text{ (}^{\circ}\text{C/W)} = (\ln(r_2/0,03015))/2 * 3,1416 * 0,034 \text{ (W/m }^{\circ}\text{C)} * 1 \text{ (m)}$$

$$r_2 = 0,0458 \text{ [m]}$$

Para encontrar el espesor utilizamos la siguiente ecuación:

$$e_{\text{aislante}} = r_2 - r_1$$

$$e_{\text{aislante}} = 0,0458(\text{m}) - 0,03015(\text{m})$$

$$e_{\text{aislante}} = 0,017 \text{ [m]}$$

$$e_{\text{aislante}} = 0,67 \text{ [in]}$$

$$e_{\text{aislante}} = 17,036 \text{ [mm]}$$

Por lo cual se seleccionó cañuela de fibra de vidrio de espesor de 1 pulgada para la tubería de diámetro nominal 2 pulgadas y por ende para todas las tuberías de retorno de condensado.

3.10 Dimensionamiento de la tubería de aire comprimido

Para poder determinar el diámetro de la tubería de aire comprimido, debemos conocer en primer lugar el consumo de todos los elementos actuantes.

3.10.1 *Cálculo del caudal necesario.* El caudal depende de los siguientes factores:

Cantidad de unidades consumidoras y consumo de aire de cada uno.

Factor de simultaneidad (ya que no siempre todas las unidades consumidoras funcionan al mismo tiempo).

Pérdidas por desgaste de las unidades consumidoras.

Duración de la conexión de las unidades consumidoras. La duración se expresa en porcentaje o como factor. Este criterio tiene en cuenta que la mayoría de unidades consumidoras no están en funcionamiento constante.

En primer lugar determinamos el consumo de aire (Ver anexo BVI y BVII) de los equipos presentes:

Tabla 36. Equipos que funcionan con aire comprimido

| Equipo | Cantidad | Consumo de aire (l/min) | Consumo de aire (m ³ /s) |
|---------------------------------|----------|-------------------------|-------------------------------------|
| Bomba neumática | 2 | 966,67 | 0,0161 |
| Posicionador electro- neumático | 5 | 3 | 0,00005 |

Fuente: Autor

Para determinar la duración de conexión hacemos una proyección del uso de los equipos, asumiendo que van a funcionar 6 de las 8 horas de jornada por lo tanto obtenemos un factor del 75%

Con estos datos podemos utilizar la ecuación 31 y encontrar el consumo de aire así:

$$\dot{V}_m = \sum_{i=1}^n (n_i * v_i * FS_i * t_i / 100) \quad (31)$$

Dónde:

n: Cantidad de unidades consumidoras

v: Consumo de aire comprimido por unidad [m³/s]

t: Duración de la conexión [%]

FS: Factor de simultaneidad (ver anexo B XII)

Reemplazando los valores obtenemos:

$$\dot{V}_m = (2 * 0,0161 * 0,94 * 75/100) + (5 * 0,00005 * 0,83 * 75/100)$$

$$\dot{V}_m = 0,02286 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pero a este valor obtenido lo tenemos que corregir en función de las pérdidas y las futuras ampliaciones, es así que utilizamos la ecuación 32, obteniendo un volumen total para el respectivo cálculo.

$$\dot{V}_t = \dot{V}_m + (\dot{V}_m * Ar/100) + (\dot{V}_m * (Ar/100) * (Fu/100)] \quad (32)$$

Dónde:

Ar: Reserva para posibles ampliaciones (30%)

Fu: Posible fugas (10%)

$$\dot{V}_t = [0,02286 + (0,02286 * 30/100) + (0,02286 * (30/100) * (10/100))]$$

$$\dot{V}_t = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.10.2 *Determinación de las pérdidas por tubería.* Como no se conoce el diámetro interior de la tubería, y es necesario saber las pérdidas debido a la rugosidad de la tubería y los accesorios, calculamos una longitud equivalente ficticia para estimar el diámetro mediante la utilización de la ecuación 33. [60]

$$L_{\text{total}} = 1,6 * L_{\text{tub}} \quad (33)$$

Se conoce que la distancia desde el distribuidor de aire hacia el punto de distribución es 50m, por lo tanto.

$$L_{\text{total}} = 1,6 * 50$$

$$L_{\text{total}} = 80 \text{ m}$$

3.10.3 *Cálculo del diámetro interior del tubo.* Podemos encontrar el diámetro interior del tubo con la ecuación 34, pero se debe tener en cuenta que es un valor aproximado por la longitud asumida anteriormente. Pero luego de obtener este valor podemos conocer las pérdidas reales y un diámetro real así:

$$d = \sqrt[5]{1,6 * 10^3 * \dot{V}_t^{1,85} * (L_{\text{total}}/\Delta p * p_1)} \quad (34)$$

Dónde:

\dot{V}_t : Caudal necesario [m^3/s]

L_{total} : Longitud total [m]

Δp : Caída de presión (no debe superar 0,1 bar)¹⁶, [Pa]= 10000 Pa

p_1 : Presión de trabajo [Pa]=120 psig = 827370,87 Pa

Reemplazando los valores calculados anteriormente obtenemos:

$$d = \sqrt[5]{1,6 * 10^3 * 0,03^{1,85} * (80/(10000 * 827370,87))}$$

$$d = 0,029 \text{ m}$$

$$d = 29 \text{ mm}$$

El diámetro calculado está entre 1 pulgada y 1 ¼ pulgadas, por lo tanto la decisión de utilizar tubería de 1 pulgada cuyo diámetro interior es de 26,6 mm.

3.10.3.1 *Cálculo del diámetro real del tubo.* Con el diámetro de 1 pulgada podemos calcular las pérdidas reales en la línea así:




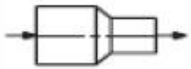
La instalación posee los siguientes accesorios:

- 12 codos de 90°
- 2 T
- 1 válvula de bola

Con lo cual se puede encontrar la longitud equivalente en metros lineales de tubería con la ayuda de la tabla 37.

¹⁶ Referencia bibliográfica [60]

Tabla 37. Longitud equivalente de accesorios en metros

| Denominación | Accesorio | Longitudes equivalentes en metros | | | | | | | | | |
|--------------------|---|--|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| | | Diámetro interior d del tubo en milímetros | | | | | | | | | |
| | | 9 | 12 | 14 | 18 | 23 | 40 | 50 | 80 | 100 | |
| Válvula esférica |  | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 1,0 | 1,3 | |
| Codo |  | 0,6 | 0,7 | 1,0 | 1,3 | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 4,5 | 6,5 | |
| Pieza en T |  | 0,7 | 0,85 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 7,0 | 10 | |
| Reductor de 2d a d |  | 0,3 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,6 | 0,9 | 1,0 | 2,0 | 2,5 | |

Fuente: Ref. [60]

Por lo tanto se obtiene:

$$L_{\text{real}} = L_i + \sum \text{Pérdidas}$$

$$L_{\text{real}} = 50 + (12 * 1,5) + (2 * 2) + (1 * 0,3)$$

$$L_{\text{real}} = 72,3 \text{ m}$$

Podemos utilizar el monograma de pérdidas (anexo AV), para determinar la pérdida de presión real con lo cual obtenemos:

$$\Delta p = 0,13 \text{ bar} = 13000 \text{ Pa}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 34, se obtiene el diámetro de la tubería real:

$$d = \sqrt[5]{1,6 * 10^3 * 0,03^{1,85} * (72,3/13000 * 827370,87)}$$

$$d = 0,0277 \text{ m}$$

$$d = 27,7 \text{ mm}$$

Con lo cual comprobamos que la tubería de 1 pulgada es óptima para cumplir nuestros requerimientos.

Una forma más sencilla y rápida de calcular las pérdidas y la caída de presión, es utilizar el programa de la marca KAESER COMPRESORES, del cual se obtienen valores aceptables. [61]

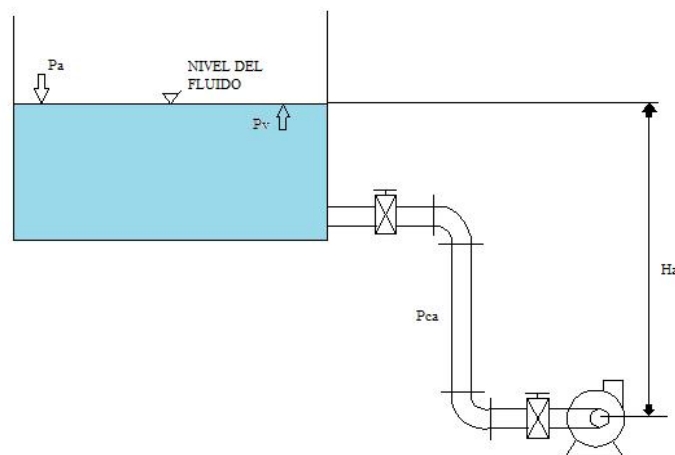
3.11 Captación del metanol destilado

Como el proceso necesita condensar el vapor de metanol ya purificado, obtenido en la parte superior de la torre de destilación haciendo uso de un intercambiador de calor de coraza y tubos enfriado por agua. Luego de condensar el metanol es almacenado en un tanque denominado RD-101, para luego ser impulsado a un tanque de almacenamiento de mayor volumen denominado TT1 y tanque TB4. (Ver anexo D VI)

3.11.1 *Selección de bomba y tuberías para la conducción de agua desde la torre de enfriamiento.* Como se necesita impulsar el fluido refrigerante desde la torre de enfriamiento, debemos seleccionar una bomba adecuada para cumplir los requerimientos tanto de caudal y altura.

La configuración del sistema de bombeo, es el caso cuando la bomba se encuentra por debajo de la succión como se observa en la figura 37.

Figura 37. Bomba por debajo de la succión



Fuente: Autor

Estas condiciones de funcionamiento está dado por el intercambiador de calor, que se resumen en la tabla 38.

Tabla 38. Condiciones de funcionamiento para la bomba

| Condiciones de trabajo | | |
|-------------------------------|-------|-------------------|
| Producto | Agua | |
| Temperatura | 25 | °C |
| Densidad absoluta | 1000 | kg/m ³ |
| Gravedad específica ρ_r | 1 | - |
| Viscosidad | 1 | cP |
| Viscosidad dinámica μ | 0,001 | Pa.s |
| Caudal \dot{q} | 160 | m ³ /h |
| Altura | 20 | m |

Fuente: Autor

Para seleccionar la bomba más adecuada seguimos el mismo procedimiento utilizado para seleccionar la bomba neumática, así utilizando las ecuaciones 1 hasta la 8 obtenemos los siguientes resultados:

3.11.1.1 *Cálculo del diámetro de tubería en la succión y descarga.* Utilizando la ecuación 1 y 2 determinamos el diámetro más apropiado para transportar el fluido, evitando que se supere las velocidades recomendadas.

Velocidad recomendada: 1,5 – 2,4 m/s

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 39. Velocidades en las tuberías de succión y descarga

| Tubería SCH 40 nueva | | |
|-----------------------------|----------|----------------|
| Diámetro nominal succión | 6 | in |
| Diámetro nominal descarga | 6 | in |
| Diámetro interno succión | 154,1 | mm |
| Diámetro interno descarga | 154,1 | mm |
| Área interna succión | 0,018651 | m ² |
| Área interna descarga | 0,018651 | m ² |
| Velocidad succión | 2,38 | m/s |
| Velocidad descarga | 2,38 | m/s |

Fuente: Autor

3.11.1.2 *Cálculo del número de Reynolds.* Para calcular el número de Reynolds utilizamos la ecuación 3 obteniendo:

$$Re = D_i * V * \delta / 1000 * \mu$$

- *Succión de la bomba*

$$Re = (154,1 * 2,38 * 1000) / (100 * 0,001)$$

$$Re = 367218,85$$

- *Descarga de la bomba*

$$Re = (154,1 * 2,38 * 1000) / (100 * 0,001)$$

$$Re = 367218,85$$

3.11.1.3 *Obtención del factor de fricción.* Mediante el uso del diagrama de Moody podemos obtener el factor de fricción para la tubería de succión y descarga. Así obtenemos:

Tabla 40. Factores de fricción

| Diagrama de Moody | |
|-----------------------------|---------------|
| Factor de fricción succión | 0,0230 |
| Factor de fricción descarga | 0,0230 |

Fuente: Autor

3.11.1.4 *Cálculo de las pérdidas primarias (Hf).* Utilizando la ecuación 4 podemos determinar las pérdidas primarias o por longitud de tubería. Las longitudes de tuberías se resumen en la tabla 41.

Tabla 41. Longitudes de tubería

| | | |
|-------------------------|----|---|
| Longitud total succión | 1 | m |
| Longitud total descarga | 20 | m |

Fuente: Autor

- *Pérdidas primarias en la succión*

$$H_f = 1000 * L * V^2 * f / 2 * g * D_i$$

$$H_f = 1000 * 1 * (2,38)^2 * 0,023/2 * 9,8 * 154,1$$

$$H_f = 0,043 \text{ m}$$

- *Pérdidas primarias en la descarga*

$$H_f = 1000 * 20 * (2,38)^2 * 0,023/2 * 9,8 * 154,1$$

$$H_f = 0,865 \text{ m}$$

3.11.1.5 *Cálculo de las pérdidas secundarias (Hs).* Conocidos los accesorios en la succión y descarga que se observan en la tabla 42, podemos determinar las pérdidas secundarias.

Tabla 42. Accesorios en el sistema de bombeo

| Accesorios | Cantidad succión | Cantidad descarga | Factor * ft |
|-------------------|------------------|-------------------|-------------|
| Codos 90° | 1 | 4 | 30 |
| Codos 45° | 0 | 1 | 16 |
| Tee 90° | 1 | 0 | 60 |
| Tee 180° | 0 | 0 | 20 |
| Válvula compuerta | 1 | 1 | 45 |
| Válvula check | 0 | 1 | 200 |

Fuente: Autor

En la tabla 6 podemos encontrar el factor de fricción para la tubería de 6 pulgadas que es igual a 0,015

Por lo tanto utilizando la ecuación 5 obtenemos:

- *Pérdidas secundarias en la succión.* Primero debemos determinar el coeficiente adimensional de pérdidas así:

$$k = (1 * 30 + 1 * 60 + 1 * 45) * 0,015$$

$$k = 2,025$$

Por lo tanto determinamos las pérdidas:

$$H_{rs} = 2,025 * 2,38^2/2 * 9,8$$

$$H_{rs} = 0,59 \text{ m}$$

- *Pérdidas secundarias en la descarga.* Determinamos el coeficiente de pérdidas

$$k = (4 * 30 + 1 * 16 + 1 * 45 + 1 * 200) * 0,015$$

$$k = 5,715$$

$$H_{rs} = 5,715 * 2,38^2 / 2 * 9,8$$

$$H_{rs} = 1,66 \text{ m}$$

3.11.1.6 *Cálculo de la carga dinámica total.* Utilizando las ecuaciones 6, 7 y 8 determinamos la carga dinámica total, con los valores de la tabla 43.

Tabla 43. Alturas y presiones del sistema de bombeo

| | | |
|-----------------------------|-----|---|
| Altura estática de succión | 0,5 | m |
| Presión de succión | 0 | m |
| Altura estática de descarga | 20 | m |
| Presión de descarga | 0 | m |

Fuente: Autor

$$TDH = H_g + (P_s - P_d) + [(V_s^2 - V_d^2) / 2 * g] + \sum H_f$$

$$TDH = (20 - 0,5) + (0 - 0) + [(2,38^2 - 2,38^2) / 2 * 9,8] + (0,043 + 0,865 + 0,5 + 1,66)$$

$$TDH = 22,65 \text{ m}$$

$$TDH = 32,22 \text{ psi}$$

3.11.1.7 *Cálculo de la potencia necesaria para accionar la bomba.* Conocida también como la entrada de potencia al freno a una bomba, se puede determinar mediante el uso de la ecuación 35.

$$bhp_i = 1,9136 * 10^{-3} * TDH * \dot{q} * \rho_r / \eta \quad (35)$$

Dónde:

bhp_i: Potencia para accionar la bomba [KW]

TDH: Carga dinámica total [psi]

q̇: Caudal [m³/h]

ρ_r: Gravedad específica [adimensional]

: Eficiencia hidráulica de la bomba [Ver anexo BII]

Por lo tanto reemplazando los valores en la ecuación 31 obtenemos:

$$bhp_i = 1,9136 * 10^{-3} * 32,22 * 160 * 1/0,55$$

$$bhp_i = 17,96 \text{ KW}$$

$$bhp_i = 24,07 \text{ Hp}$$

Por lo tanto se utilizará una bomba centrífuga de 25 Hp, con tuberías de succión y descarga de 6 pulgadas.

3.11.1.8 *Cálculo de la altura neta positiva en la aspiración (NPSH).* Por definición el NPSH es la altura total de carga a la entrada de la bomba, la cual necesitamos conocer para seleccionar la bomba más adecuada en nuestro sistema de bombeo.

La altura neta positiva se la puede calcular con la ecuación 36.

$$NPSH = (P_a/\gamma) + H_a - P_{ca} - (P_v/\gamma) \quad (36)$$

Dónde:

NPSH: Altura neta positiva [m]

: Peso específico del líquido [N/m³]

P_a: Presión de aspiración [Pa]

H_a: Altura geométrica de aspiración [m]

Pv: Presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo [Pa]

Pca: Pérdida de carga en la línea de succión [m]

Como la instalación se la va a realizar en la Fábrica la Fabril SA en la ciudad de Manta, que se encuentra a una altura de 6 metros sobre el nivel del mar, podemos considerar la presión atmosférica de 760 mmHg (101325 Pa).

Altura geométrica de aspiración: 0,5 m

Presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo¹⁷: 23,756 mmHg = 3167,21 Pa

Pérdida de carga en la línea de succión: $H_f + H_{rs} = 0,043 + 0,59 = 0,633$ m

Peso específico del líquido: 9800 N/m³

Por lo tanto reemplazando los valores en la ecuación 36, obtenemos:

$$NPSH = (101325 \text{ Pa} / 9800 \text{ N/m}^3) + 0,5 \text{ m} - 0,633 - (3167,21 / 9800 \text{ N/m}^3)$$

$$NPSH = 9,88 \text{ m}$$

Para evitar el fenómeno de la cavitación se debe cumplir que el NPSH disponible tiene que ser mayor que el NPSH requerido así:

$$NPSH > NPSH_r$$

3.11.2 *Capacidad de enfriamiento de la torre.* Uno de los servicios de importancia de la columna de destilación es la torre de enfriamiento, se la puede seleccionar en función de los galones por minuto (GPM) que circulan por el sistema de condensación.

En la empresa La Fabril S.A., para este proyecto se asignó una torre de enfriamiento, la cual se tuvo que recuperar de la marca Marley NC 3011 GS, que posee una capacidad de enfriamiento de 856 GPM (195 m³/h). (Ver anexo D IV)

La cual cumple la capacidad del sistema que es de 704 GPM (160 m³/h).

¹⁷ Ver anexo BX. [56]

En este punto podemos calcular el flujo de calor que se está transmitiendo al condensar el metanol, con la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * \Delta T \quad (37)$$

Dónde:

\dot{Q} : Flujo de calor [KJ/h]

\dot{m} : Flujo de masa [kg/h]

c_p : Calor específico del agua [KJ/kg °C]

ΔT : Diferencia de temperatura [°C]

Podemos determinar las variables con los siguientes datos:

El flujo de masa:

$$\dot{m} = 160 (\text{m}^3/\text{h}) * 1000 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$\dot{m} = 16000 [\text{kg}/\text{h}]$$

Diferencia de temperatura:

Temperatura de ingreso a la torre: 38 °C

Temperatura de salida de la torre: 31 °C

$$\Delta T = (38 - 31)^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 7^\circ\text{C}$$

Cabe recalcar que las temperaturas se las tomó cuando ya el sistema estaba en prueba de funcionamiento.

Por lo tanto reemplazando los valores obtenemos:

$$\dot{Q} = 16000 (\text{kg}/\text{h}) * 4,1813 (\text{KJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) * (7)^\circ\text{C}$$

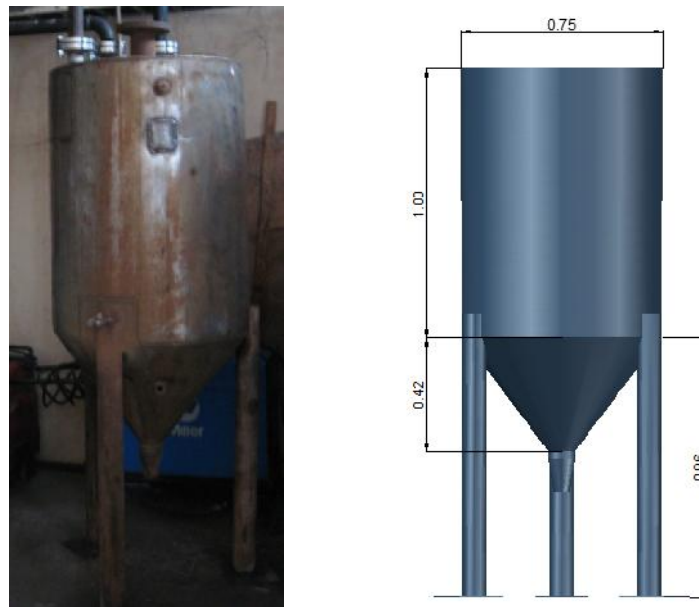
$$\dot{Q} = 4683056 \text{ KJ}/\text{h}$$

$$\dot{Q} = 1,119 * 10^6 \text{ Kcal/h}$$

3.11.3 Selección del tanque de acumulación y la bomba de retorno de condensado.

Para la recolección del condensado que se produce en los recalentadores se usó un tanque recuperado de otro proceso, cuyo material es de acero inoxidable, como se muestra en la figura 38.

Figura 38. Tanque de recuperación de condensado



Fuente: Autor

Normalmente la succión de la bomba se la instala a la mitad de la altura del cono, esto es para evitar que cualquier suciedad ingrese a la bomba y se pueda dañar, por lo tanto al calcular la capacidad de almacenamiento del tanque obtenemos $0,36 \text{ m}^3$. (Ver anexo A III)

Ahora para determinar el caudal tenemos que asumir un tiempo de bombeo, mientras más corto sea el tiempo más potencia requiere la bomba para su funcionamiento, por lo tanto se asume un tiempo de 5 minutos para descargar los $0,36 \text{ m}^3$, por lo tanto obtenemos:

$$\dot{q} = V/t \quad (38)$$

$$\dot{q} = 0,36 \text{ m}^3/5 \text{ min}$$

$$\dot{q} = 0,072 \text{ m}^3/\text{min} = 4,32 \text{ m}^3/\text{h}$$

Al seguir el mismo procedimiento para encontrar la potencia de la bomba de la torre de enfriamiento, encontramos la potencia necesaria para este sistema dando como resultado.

$$\text{Potencia} = 0,91 \text{ Hp}$$

Por lo que se sugiere que se utilice una bomba de 1 Hp. Para observar el proceso de cálculo ver anexo A II.

De igual manera podemos calcular la altura neta positiva en la aspiración, utilizando la ecuación 36, de esta manera obtenemos:

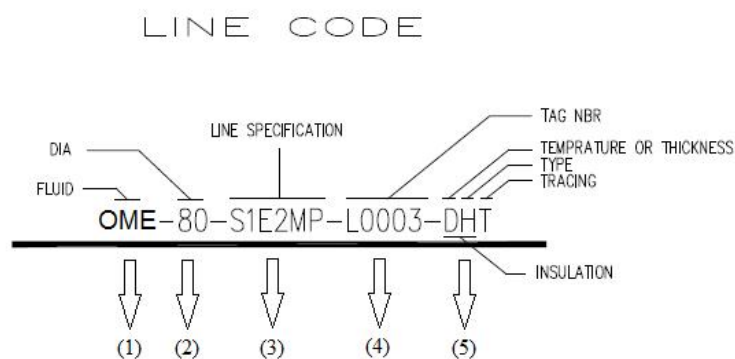
$$\text{NPSH} = (P_a/\gamma) + H_a - P_{ca} - (P_v/\gamma)$$

$$\text{NPSH} = (101325/9800) + 1,5 - 0,972 - (101325/9800)$$

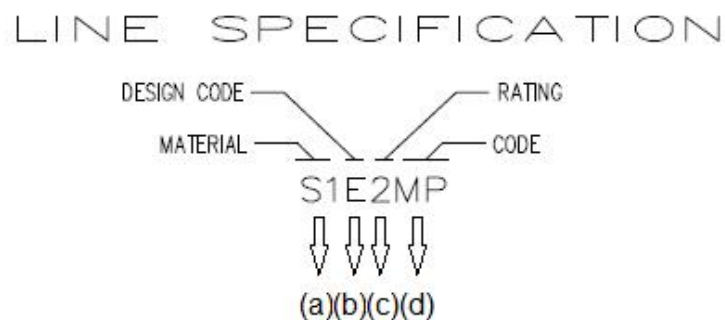
$$\text{NPSH} = 0,528 \text{ m}$$

3.12 Codificación de las tuberías

Para identificar las tuberías se las codifica tomando en cuenta el servicio que prestan, el diámetro nominal, el tipo de material, el rango de temperatura, etc. La forma de codificación de detalla a continuación:



- 1) Es el tipo de fluido que va a circular por la tubería, existe sigla para los diferentes fluidos.
- 2) Es el diámetro nominal de la tubería instalada, puede ser escrita en norma DIN o norma ANSI, dependiendo de la tubería instalada.
- 3) En esta sección del código, se puede identificar el tipo de material del cual está construido la tubería (a), código de diseño (b), la presión máxima de trabajo (c) y el proceso (d). Como se puede observar a continuación:



- 4) Corresponde al número de tubería instalada.
- 5) En esta sección se hace referencia al rango de temperatura de trabajo, si posee o no aislamiento, y líneas tracing. Para mejor entendimiento ver anexo B XIII y B XIV.

Los diferentes códigos del proceso de la destilación del metanol, se pueden observar en diagrama P&ID (anexo C III).

CAPÍTULO IV

4. INSTALACIÓN DE LA COLUMNA DE DESTILACIÓN

4.1 Consideraciones para el montaje e instalación

El montaje e instalación de este proyecto por su ubicación (ver anexo C II), está dividido en etapas y cada una tiene sus consideraciones tanto de ingeniería y de seguridad. Entre los cuales tenemos:

4.1.1 *Medición de concentración de gases.* Al momento de iniciar el proyecto la planta de biodiesel de la empresa LA FABRIL SA estaba en proceso continuo de elaboración de producto, por lo cual se tuvo que realizar constantemente la medición de concentración de gases conjuntamente con el equipo de seguridad industrial de la empresa.

Dicho monitoreo se lo realizó para garantizar el bienestar de los trabajadores y constatar que el ambiente no sea explosivo ya que en ciertos lugares de la planta existe presencia de metanol gasificado.

Figura 39. Instrumento (MSA Altair 5X) utilizado para la medición de gases



Fuente: Ref. [57]

4.1.2 *Construcción de pantalla protectora.* El propósito de construir esta pantalla es para aislar a los trabajadores de la planta que se encuentra en funcionamiento, evitando así la contaminación por los trabajos realizados.

A demás como la proyección de construcción de la estructura es de corte y suelda es necesario impedir que las chispas generadas salgan del lugar de trabajo evitando así un posible incendio por los productos inflamables presentes en la planta.

Figura 40. Construcción pantalla protectora



Fuente: Autor

4.1.3 *Construcción de base para columna.* Como la columna de destilación de metanol necesita una base sólida para su asentamiento y por indicaciones de la empresa Fénix (empresa que proporcionó la columna) debía tener una altura de 2,50 metros desde el nivel del piso con un diámetro de 1, 50 metros, con lo cual se realizó el estudio de ubicación en la planta de elaboración de biodiesel de la empresa LA FABRIL SA. (Ver anexo C II)

Este estudio se lo realizó buscando el lugar apropiado donde:

En primer lugar existiera el espacio lo suficientemente amplio para la columna y todos sus elementos y accesorios indispensables para su funcionamiento.

En segundo lugar tomando en cuenta que la posición de la columna no interfiera ni incomode a las actividades diarias realizadas en dicha planta.

Obteniéndose como resultado satisfactorio ubicación actual donde se realizó la construcción de la base.

Figura 41. Construcción de la base para la columna de destilación



Fuente: Autor

4.1.4 *Adecuada selección de materiales y equipos.* Por seguridad y recomendaciones técnicas los equipos a utilizarse deben ser apropiados para el manejo de dichas sustancias, teniendo características como antiexplosivas (explosion proof), o la utilización de equipos que funcionen sin la utilización de energía eléctrica como es el caso de las bombas neumáticas.

Evitando así la posible generación de alguna chispa eléctrica que conseguiría desatar un incendio. (Ver anexo D V y D VI)

4.1.5 *Construcción de la estructura metálica para columna.* La estructura metálica que soportarán los equipos y accesorios de la columna de destilación se la construye por el método de corte y soldadura, para lo cual se confinó el espacio mediante la utilización de plywood (panel de madera), para evitar la caída de chispas hacia los tamices utilizados para filtrar el biodiesel.

Esta estructura se avanzará dejando los accesos necesarios para instalar la columna de destilación de metanol, para luego de instalada, completar la estructura y darle el acabado final.

Figura 42. Estructura metálica



Fuente: Autor

4.2 Instalación columnas C-101 y C-201

Las columnas C-101 y C-102, son equipos de construcción nacional, por lo cual son los primeros equipos en ser instalados.

Figura 43. Instalación columnas pequeñas



Fuente: Autor

4.3 Instalación columna de destilación de metanol

Antes del montaje se debe identificar cuáles son los factores que pueden llevar al fracaso dicha instalación, como por ejemplo objetos que impidan el libre acceso de los equipos y si es necesario remover temporáneamente o definitivamente, según requiera el caso, las estructuras que impidan el montaje.

Figura 44. Instalación columna de destilación



Fuente: Autor

4.4 Instalación de los servicios de funcionamiento de la columna de destilación

Para la instalación de las tuberías se consideró minimizar en lo posible la utilización de soldadura dentro de la planta por consideraciones ya antes mencionadas, lo que se hizo es usar uniones bridadas y para soldar dichas bridas en los tubos se utilizó los talleres alejados de la planta de producción de biodiesel. Ver anexo DIII para visualizar los servicios instalados.

En las siguientes imágenes se puede apreciar cómo queda finalmente la instalación de la columna de destilación.

Figura 45. Antes y después de la instalación



Fuente: Autor

4.5 Evaluación de la columna de destilación de metanol

4.5.1 *Prueba hidrostática en la columna de destilación y tuberías.* Antes de que la columna de destilación pueda iniciar su funcionamiento en forma continua, debemos realizar una prueba hidrostática.

Consiste en llenar completamente de agua blanda (desmineralizada) o algún otro fluido no compresible como el aceite, tanto la columna como las tuberías; luego de esto se inyectó aire comprimido hasta llegar a la presión de prueba deseada, este procedimiento se realiza para determinar la resistencia y la hermeticidad del material, las uniones soldadas y bridadas.

Se puede determinar la presión de prueba de resistencia con la siguiente ecuación:

$$P_{TR} = 1,5 * P * (S_T/S) \quad (39)$$

Dónde:

P_{TR} : Mínima presión de prueba manométrica para resistencia del material [psig]

P: Presión interna de trabajo [psig]

S_T : Esfuerzo admisible a la temperatura de prueba (ASME B31.1, Tabla A-1)

S: Esfuerzo admisible a la temperatura de diseño (ASME B31.1, Tabla A-1)

Las condiciones de trabajo de la columna de destilación son las siguientes (ver anexo CI):

Tabla 44. Condiciones de trabajo de la columna de destilación

| | | |
|--------------------------|------|-----|
| Presión de operación | 14,7 | psi |
| Temperatura de operación | 115 | °C |

Fuente: Autor

Por lo tanto reemplazando los valores en la ecuación 39, obtenemos la presión mínima para la prueba de resistencia.

$$P_{TR} = 1,5 * 14,7 * (16000/16000)$$

$$P_{TR} = 22,05 \text{ psig}$$

La norma NRF-150-PEMEX-2004 que toma como referencias las normas ASME B31, los códigos del instituto americano del petróleo API, entre otras, manifiesta que la presión para la prueba de hermeticidad tiene un valor equivalente al 90% de la presión para la prueba de resistencia, por lo tanto tenemos:

$$P_{TH} = 0,9 * P_{TR} \quad (40)$$

$$P_{TH} = 19,8 \text{ psig}$$

En resumen adoptamos los valores de presión para las pruebas:

Tabla 45. Presiones adoptadas para las pruebas

| | Presión | Unidades | Tiempo |
|-------------------------|----------------|-----------------|---------------|
| Presión de resistencia | 22 | psi | 8 horas |
| Presión de hermeticidad | 20 | psi | 24 horas |

Fuente: Autor

Una vez determinadas las presiones de prueba, procedemos a realizar la prueba en la columna de destilación por el tiempo de 24 horas como se indica en la tabla 45.

Figura 46. Prueba de hermeticidad en la columna de destilación



Fuente: Autor

4.5.2 *Efectividad de destilación de la columna.* Para determinar la efectividad de destilación de la columna se realizó una medida de concentración del producto almacenado en los tanques TT2 y TT3.

Mediante el uso de un medidor de densidad y concentración portátil del tipo DMA 35 de la fábrica Anton Paar. Esta medición la realizaron los coordinadores de la planta de Hidrólisis, departamento de Oleoquímica, dando como resultado una concentración del 87%.

Figura 47. Medidor de densidad portátil, DMA-35



Fuente: Ref. [58]

Luego de las pruebas necesarias de funcionamiento, se arrancó la planta y se destiló el metanol contenido en los tanques. Se tomaron varias muestras para determinar la concentración dando como resultado:

Concentración: 99.7 y 99.9 % de pureza

Con lo que se comprobó la efectividad de destilación de la columna.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS FINANCIERO

5.1 Costos

En el presente análisis económico se va a detallar los gastos producidos en la instalación de la columna de destilación de metanol y todos los servicios.

5.2 Costos directos

Los costos directos se involucra los gastos por: materiales, mano de obra, equipos o maquinaria utilizada y transporte. Dichos costos totales se resumen en la tabla 51.

5.2.1 Costos de materiales

Tabla 46. Costo de materiales

| Descripción | Unidad | Costo unitario | Cant. | Sub Total |
|--------------------------------------|--------|----------------|-------|----------------------|
| Bomba centrífuga autocebante (P-101) | unidad | 4114,37 | 1 | 4114,37 |
| Bomba neumática Wilden | unidad | 3037,29 | 2 | 6074,58 |
| Columna C-101 | unidad | 13110,00 | 1 | 13 110,00 |
| Columna C-201 | unidad | 12207,50 | 1 | 12 207,50 |
| Tanque de reflujo RD-301 | unidad | 4132,50 | 1 | 4 132,50 |
| Bomba centrífuga 25 Hp | unidad | 3172,40 | 1 | 3 172,40 |
| Bomba centrifuga para condensados | unidad | 609,46 | 1 | 609,46 |
| Equipos principales proveedor FÉNIX | unidad | 165000,00 | 1 | 165 000,00 |
| Brida 16" acero al carbono | unidad | 760,55 | 2 | 1 521,10 |
| Brida 18" acero al carbono | unidad | 550,00 | 1 | 550,00 |
| Pernos espárragos 1 1/4 " x 1,35m | unidad | 90,00 | 16 | 1 440,00 |
| Materiales | unidad | 122157,62 | 1 | 122 157,62 |
| SUB-TOTAL A | | | | \$ 334 089,53 |

Fuente: Autor

5.2.2 Costos de Instalación

Tabla 47. Costos de instalación

| Descripción | Unidad | Cant. | Costo unitario | Sub Total |
|--|--------|-------|----------------|---------------------|
| Instalación Tubos de 1/2" C.S. | m | 28,9 | 6,00 | 173,40 |
| Instalación Tubos de 3/4" C.S. | m | 49,8 | 6,00 | 298,80 |
| Instalación Tubos de 1" C.S. | m | 24,3 | 6,00 | 145,80 |
| Instalación Tubos de 1 1/2" C.S. | m | 8,5 | 8,40 | 71,40 |
| Instalación Tubos de 2" C.S. | m | 329,8 | 8,40 | 2 770,32 |
| Instalación Tubos de 3" C.S. | m | 158,5 | 9,60 | 1 521,60 |
| Instalación Tubos de 4" C.S. | m | 4 | 13,20 | 52,80 |
| Instalación Tubos de 6" C.S. | m | 68 | 13,20 | 897,60 |
| Instalación Tubos de 1/4" S.S. | m | 2,35 | 6,00 | 14,10 |
| Instalación Tubos de 1" S.S. | m | 6 | 12,00 | 72,00 |
| Instalación Tubos de 2" S.S. | m | 106 | 14,40 | 1 526,40 |
| Instalación Tubos de 3" S.S. | m | 2,25 | 16,80 | 37,80 |
| Instalación Tubos de 4" S.S. | m | 16 | 19,20 | 307,20 |
| Instalación Tubos de 6" S.S. | m | 3,5 | 19,20 | 67,20 |
| Instalación Tubos de 12" S.S. | m | 6 | 24,00 | 144,00 |
| Instalación Tubos de 16" S.S. | m | 6,15 | 35,00 | 215,25 |
| Corte y soldadura de plancha S.S. e =5mm.(Fabricación tubería 16") | m | 5 | 80,00 | 400,00 |
| Corte y soldadura de codos de 12" | unidad | 4 | 180,00 | 720,00 |
| Reparación de torre de enfriamiento | h/h | 250 | 4,20 | 1 050,00 |
| Montaje de equipos | h/h | 100 | 4,20 | 420,00 |
| Montaje columna C-301 | h/h | 180 | 4,20 | 756,00 |
| Montaje y armado de mallas filtrantes columna C-101 | h/h | 110 | 4,20 | 462,00 |
| Montaje y armado de mallas filtrantes columna C-201 | h/h | 110 | 4,20 | 462,00 |
| Montaje de bombas | unidad | 7 | 50,00 | 350,00 |
| Bypass para condensados | unidad | 3 | 50,00 | 150,00 |
| Distribuidor para vapor | unidad | 1 | 80,00 | 80,00 |
| Bandejas colectoras para bombas | unidad | 4 | 80,00 | 320,00 |
| Instrumentación | h/h | 48 | 4,20 | 201,60 |
| Reubicación de tuberías (área de la torre) | h/h | 72 | 4,20 | 302,40 |
| Soportaría adicional | h/h | 96 | 4,20 | 403,20 |
| Desmontaje de tolva y elevador | h/h | 10 | 4,20 | 42,00 |
| Horas adicionales (feriados, fines de semana) | h/h | 400 | 8,40 | 3 360,00 |
| SUB- TOTAL B | | | | \$ 17 794,87 |

Fuente: Autor

5.2.3 Costos de construcción

Tabla 48. Costos de construcción

| Descripción | Unidad | Cant. | Costo unitario | Sub Total |
|--|----------------|---------|----------------|---------------------|
| Construcción pantalla protectora | h/h | 444 | 4,20 | 1 864,80 |
| Fibra de vidrio, torre de enfriamiento | m ² | 40 | 22,50 | 900,00 |
| Construcción de la cimentación | unidad | 1 | 12804,90 | 12 804,90 |
| Construcción Estructura torre | kg | 3291,78 | 3,53 | 11 619,98 |
| Construcción Estructura columna | kg | 2990,29 | 3,53 | 10 555,72 |
| Montaje termo pozos | h/h | 57 | 4,20 | 239,40 |
| Montaje electroválvulas | h/h | 32 | 4,20 | 134,40 |
| Pintura Tubería para torre de enfriamiento | m | 68 | 23,00 | 1 564,00 |
| Instalación Aislamiento térmico | m | 488,30 | 2,37 | 1 159,55 |
| Gasfitería | m | 460 | 2,50 | 1 150,00 |
| Montaje eléctrico | unidad | 1 | 828,00 | 828,00 |
| SUB-TOTAL C | | | | \$ 42 820,76 |

5.2.4 Costos de Equipos

Tabla 49. Costos de equipos

| Descripción | Unidad | Cant. | Costo unitario | Sub Total |
|------------------|--------|-------|----------------|--------------------|
| Alquiler de grúa | día | 4 | 485,00 | 1 940,00 |
| SUB-TOTAL C | | | | \$ 1 940,00 |

Fuente: Autor

5.2.5 Costos de transporte

Tabla 50. Costos de transporte

| Descripción | Unidad | Cant. | Costo unitario | Sub Total |
|-------------|--------|-------|----------------|--------------------|
| Importación | unidad | 1 | 13308,60 | 13 308,60 |
| SUB-TOTAL D | | | | \$13 308,60 |

Fuente: Autor

5.2.6 *Costo total directo.* Para obtener el costo total directo sumamos los subtotales de los ítems anteriores, obteniendo:

Tabla 51. Costo total directo

| DESCRIPCIÓN | COSTO (\$) |
|---------------------|----------------------|
| Materiales | 334 089,53 |
| Instalación | 17 794,87 |
| Construcción | 42 820,76 |
| Equipos | 1 940,00 |
| Transporte | 13 308,60 |
| Costo total directo | \$ 409 953,43 |

Fuente: Autor

5.3 Costos indirectos

Los costos indirectos son la suma de gastos técnico-administrativo necesarios para la correcta realización de cualquier proceso productivo [68]

Para el cálculo de los costos indirectos para este proyecto se estima el 25% del costo total directo, por lo tanto obtenemos:

Tabla 52. Costo total indirecto

| | Total |
|-----------------------|----------------------|
| Costo total indirecto | \$ 102 488,44 |

Fuente: Autor

5.4 Costos totales

Los costos totales se obtiene mediante la suma del costo total directo y el costo total indirecto, a este valor se le añade el I.V.A. que es el 12% en nuestro país, obteniendo:

Tabla 53. Costos totales

| | |
|-------------------|----------------------|
| Costos directos | 409 953,76 |
| Costos indirectos | 102 488,44 |
| Total (usd) | 512 442,20 |
| I.V.A (12%) | 61 493,06 |
| Costo total | \$ 573 935,26 |

Fuente: Autor

5.5 Depreciación

La depreciación resulta ser el desgaste que sufre un activo fijo como resultado de su uso o abuso. [70]

La vida normal de los activos utilizados en este proyecto tiene en promedio de 10 años.
[69]

Por lo tanto el porcentaje de depreciación anual es del 10%, lo cual lo podemos comprobar con la ecuación 41.

$$\%_{\text{depreciación}} = 100\% / \text{Años}_{\text{activo}} \quad (41)$$

$$\%_{\text{depreciación}} = 100\% / 10 = 10\% \text{ Anual}$$

5.5.1 *Cálculo de la depreciación.* Para calcular la depreciación debemos tener en cuenta:

La vida útil

El valor de salvamento

El método a aplicar

5.5.1.1 *Vida útil.* Es la duración que se asigna a un bien como elemento de provecho para la empresa. Para determinara la vida útil se basa en:

Tiempo: años

Capacidad de producción: producción total

El tiempo normal de depreciación de los activos utilizados en este proyecto tiene una en promedio una vida de 10 años. [69]

5.5.1.2 *Valor de salvamento.* Al valor de una propiedad al final de su vida útil se llama valor de salvamento o valor de rescate.

En otras palabras, es la cantidad que se recupera por la venta, el intercambio o descuento en la adquisición de un activo sustituto. Este debe contabilizarse como un ingreso dentro del flujo de efectivo del equipo. [71]

El valor de salvamento podemos calcular por la ecuación 42.

$$V_{\text{salvamento}} = V_{\text{inicial}} - V_{\text{inicial}} * n/N \quad (42)$$

Dónde:

$V_{\text{salvamento}}$: Valor de salvamento en \$

V_{inicial} : Valor de costo inicial en \$

n : Tiempo de vida útil en años

N : Tiempo de depreciación en años

Para este proyecto se va a considerar que la vida útil tiene el mismo valor del tiempo de depreciación en este caso 10 años.

Por lo tanto tenemos:

$$V_{\text{salvamento}} = 573\,935,26 - 573\,935,26 * 10/10$$

$$V_{\text{salvamento}} = \$ 0$$

5.5.1.3 Método a aplicar

Una vez determinado el valor de salvamento y establecido las bases para la determinación de la vida útil, elegimos el método para distribuir dicho valor, por lo tanto:

5.5.1.3.1 *Método de la línea recta.* En este método, la depreciación es considerada como función del tiempo y no de la utilización de los activos.

Resulta un método simple que viene siendo muy utilizado y que se basa en considerar la obsolescencia progresiva como la causa primera de una vida de servicio limitada, y considerar por tanto la disminución de tal utilidad de forma constante en el tiempo. [72]

Para calcular la depreciación anual utilizamos la ecuación 43.

$$D_{\text{anual}} = V_{\text{inicial}} - V_{\text{salvamento}}/n \quad (43)$$

Dónde:

D_{anual} : Depreciación anual en \$

V_{inicial} : Valor de costo inicial en \$

$V_{\text{salvamento}}$: Valor de salvamento en \$

n: Tiempo de vida útil en años (10 años)

Reemplazando los valores en la ecuación 5.3 se obtiene:

$$D_{\text{anual}} = 573\,935,26 - 0/10$$

$$D_{\text{anual}} = \$ 57\,393,53$$

Como el equipo se deprecia en 10 años obtenemos los siguientes datos:

Tabla 54. Depreciación anual del equipo

| Tiempo | Depreciación anual | |
|---------|--------------------------|-----------|
| 1° año | = 573 935,26 - 57 393,53 | 516541,73 |
| 2° año | = 516 541,73 - 57 393,53 | 459148,21 |
| 3° año | = 459 148,21 - 57 393,53 | 401754,68 |
| 4° año | = 401 754,68 - 57 393,53 | 344361,16 |
| 5° año | = 344 361,16 - 57 393,53 | 286967,63 |
| 6° año | = 286 967,63 - 57 393,53 | 229574,10 |
| 7° año | = 229 574,10 - 57 393,53 | 172180,58 |
| 8° año | = 172 180,58 - 57 393,53 | 114787,05 |
| 9° año | = 114 787,05 - 57 393,53 | 57393,53 |
| 10° año | = 57 393,53 - 57 393,53 | 0,00 |

Fuente: Autor

5.6 Determinación del gasto de energía

En este análisis de gastos de energía, se va a determinar los costos por hora de los recursos energéticos utilizados, para así determinar el costo por cada 931 kg-h de metanol rectificado (destilado). Cabe recalcar que la capacidad de destilación de la columna de destilación fue proporcionada por la empresa constructora de la columna.

Podemos determinar capacidad de destilación en volumen mediante la ecuación 44.

$$V = m/\rho \quad (44)$$

Dónde:

V: Volumen [m^3 -h]

m: Masa de destilación [kg-h]

ρ : Densidad del metanol [kg/m^3]

Por lo tanto reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 44, obtenemos:

$$V = (931 \text{ kg} - h)/(787 \text{ kg}/m^3)$$

$$V = 1.18 \text{ m}^3 - h$$

Transformando los metros cúbicos a toneladas, sabiendo que $1 \text{ m}^3 = 1,048 \text{ Ton}$, se obtiene:

$$V = 1.18 / 1,048$$

$$V = 1,24 \text{ Ton} - h$$

5.6.1 *Energía eléctrica.* Para calcular la cantidad de energía eléctrica consumida, determinamos el consumo de cada equipo utilizado en el proceso de destilación de metanol.

Para determinar el consumo por hora de cada equipo utilizamos la ecuación 45.

$$C_{\text{hora}} = C_{\text{equipo}} * T \quad (45)$$

Dónde:

C_{hora} : Consumo por hora del equipo [Kw-h]

C_{equipo} : Consumo del equipo [Kw]

T: Tiempo de utilización del equipo [h]

Los equipos y su consumo de energía eléctrica se resumen en la tabla 55.

Tabla 55. Consumos de energía eléctrica

| Equipo | Potencia [hp] | Consumo [kw] | Tiempo de uso [h] | Consumo total [kw-h] |
|-----------------------------|---------------|--------------|-------------------|----------------------|
| Bomba P-101 | 3 | 2,25 | 1 | 2,25 |
| Bomba P-201 | 3 | 2,25 | 1 | 2,25 |
| Bomba P-301 | 3 | 2,25 | 1 | 2,25 |
| Bomba P-302 | 2 | 1,50 | 1 | 1,50 |
| Bomba condensado | 1,5 | 1,13 | 1 | 1,13 |
| Bomba torre de enfriamiento | 25 | 18,75 | 1 | 18,75 |
| Motor ventilador | 15 | 11,25 | 1 | 11,25 |
| Consumo total por hora | | | | 39,38 |

Fuente: Autor

El costo del kw-h en nuestro país es de 0,12 dólares americanos por lo cual se puede calcular el costo por hora de la energía eléctrica.

$$\text{Costo}_{\text{hora}} = 39,38 [\text{Kw} - \text{h}] * 0,12 [\$/\text{Kw} - \text{h}]$$

$$\text{Costo}_{\text{hora}} = \$ 4,73$$

Este valor obtenido es el costo de energía eléctrica por 1,24 Ton – h, para obtener el valor para una tonelada realizamos una regla de tres simple directa, de tal forma se obtiene:

$$\text{Costo}_{\text{hora}} = 4,73 [\$] * 1 [\text{ton} - \text{h}]/1,24 [\text{Ton} - \text{h}]$$

$$\text{Costo}_{\text{hora}} = \$ 3,81$$

5.6.2 *Vapor de agua.* Por condiciones de funcionamiento el gasto de vapor es de 4000 lb/h.

El costo por libra de vapor tiene un valor de 0,12 dólares americanos, este dato fue proporcionado por la empresa donde se instaló la columna de destilación. Por lo tanto se obtiene un valor de:

$$\text{Costo}_{\text{hora}} = 4\,000 [\text{lb/h}] * 0,12 [\$/\text{lb/h}]$$

$$\text{Costo}_{\text{hora}} = \$ 480,00$$

Realizamos el mismo procedimiento anterior para obtener el costo por Ton – h:

$$\text{Costo}_{\text{hora}} = 480,00 [\text{\$}] * 1 [\text{ton} - \text{h}] / 1,24 [\text{Ton} - \text{h}]$$

$$\text{Costo}_{\text{hora}} = \$ 387,10$$

5.6.3 *Gasto de energía totales.* Se puede proyectar los gastos de energía eléctrica y de vapor de agua en forma anual.

Conociendo que la columna de destilación de metanol va a trabajar 6 horas diarias y tres días a la semana, por lo tanto obtenemos:

5.6.3.1 *Energía Eléctrica*

$$C_{\text{anual}} = C_{\text{hora}} * \#_{\text{horas}} * \text{Días}_{\text{funcionamiento}} * \#_{\text{semanas}} \quad (46)$$

Dónde:

C_{anual} : Costo anual de la energía eléctrica [\\$]

C_{hora} : Costo por hora [\\$]

$$C_{\text{anual}} = \$ 3,81 * 6 * 3 * 52$$

$$C_{\text{anual}} = \$ 3\,566,16$$

5.6.3.2 *Vapor de Agua*

$$C_{\text{anual}} = C_{\text{hora}} * \#_{\text{horas}} * \#_{\text{días}} * \#_{\text{semanas}} \quad (47)$$

Dónde:

C_{anual} : Costo anual de la energía eléctrica [\\$]

C_{hora} : Costo por hora [\\$]

$$C_{\text{anual}} = \$ 387,10 * 6 * 3 * 52$$

$$C_{\text{anual}} = \$ 362\,321,86$$

5.6.3.3 *Gasto total.* Al sumar los valores totales de los gastos de energía podemos encontrar:

Tabla 56. Gasto total en la destilación de metanol

| Descripción | Valor [\$] |
|-------------------|----------------------|
| Energía eléctrica | 3 566,160 |
| Vapor de agua | 362 321,86 |
| Mantenimiento | 91 472,00 |
| Total | \$ 457 360,02 |

Fuente: Autor

5.7 Cálculo del ingreso anual

Al proyectar el consumo de metanol anual, obtenemos un valor de 1160 Toneladas-año.

El precio por tonelada de metanol con una pureza del 99,9 % de pureza se encuentra a 500 dólares americanos, podemos estimar el costo total del metanol.

$$B_{\text{anual}} = C_{\text{Ton}} * \text{Consumo} \quad (48)$$

Dónde:

B_{anual} : Costo anual del metanol [\$]

C_{hora} : Costo por tonelada [\$]

Consumo: Consumo total de metanol

$$B_{\text{anual}} = \$ 500 * 1160$$

$$B_{\text{anual}} = \$ 580\,000,00$$

Para realizar el análisis financiero, podemos asumir que este es el valor de ingreso anual.

5.8 Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN)

Para calcular el TIR y el VAN, debemos conocer todos los valores de ingreso y de egreso al año, dichos valores se resumen en la tabla 57.

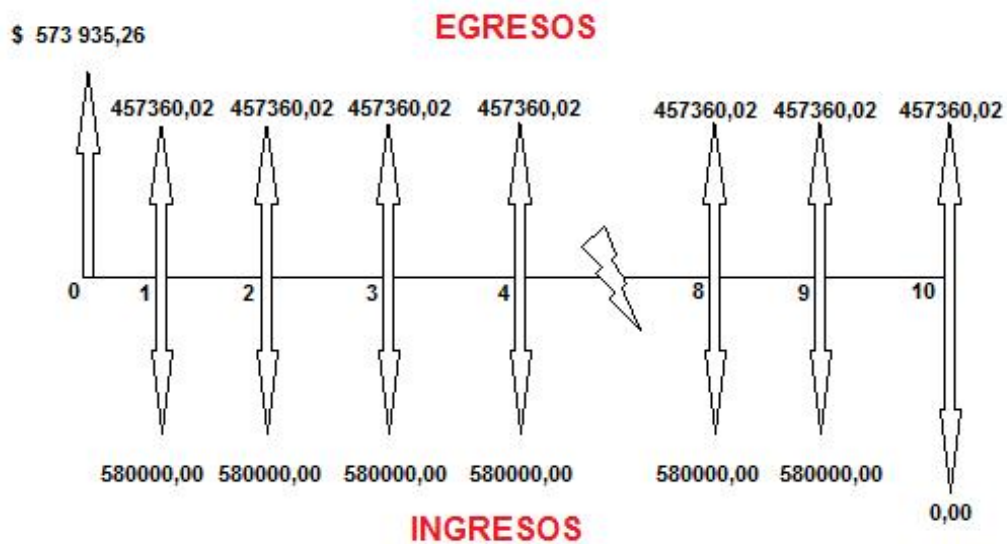
Tabla 57. Ingresos y egresos por año

| Ingresos | |
|---------------------|---------------|
| Ingreso anual | \$ 580 000,00 |
| Valor de salvamento | \$ 0,00 |
| Egresos | |
| Costo de la columna | \$ 573 935,26 |
| Gasto de energías | \$ 457 360,02 |

Fuente: Autor

Esta distribución se la puede observar en la figura 48.

Figura 48. Distribución de los ingresos y egresos por año



Fuente: Autor

5.8.1 *Cálculo del valor actual neto (VAN).* El cálculo del valor actual neto, es un método que proporciona una valoración financiera en el momento actual de los flujos de caja netos proporcionados por la inversión.

Es decir, presenta la relación entre los ingresos y los egresos de una inversión en función del tiempo. Se puede utilizar la ecuación 49, para calcular su valor.

$$VAN = F(P/A; \%; n) + V_{salv}(P/F; \%; n) - \{E(P/A; \%; n) + I_0\} \quad (49)$$

Dónde:

F: Flujo de caja anual (ingresos)

V_{salv}: Valor de salvamento

E: Egresos anuales

I₀: Inversión inicial

P/A: Coeficiente del valor presente de pagos de serie uniforme

P/F: Coeficiente de valor presente de pagos únicos

%: Porcentaje a calcular

n: Tiempo en años

Reemplazando los valores calculados anteriormente en la ecuación 5.9, obtenemos:

- i= 15%; n= 10

$$\text{VAN} = 580000(\text{P/A ; 15\%; 10}) + 0(\text{P/F ; 15\%; 10}) - \{457360,02(\text{P/A ; 15\%; 10}) + 573935,26\}$$

$$\text{VAN} = 580000(5,0188) + 0(0,2472) - \{457360,02(5,0188) + 573935,26\}$$

$$\text{VAN} = \$ 41570,27$$

- i= 16%; n= 10

$$\text{VAN} = 580000(\text{P/A ; 16\%; 10}) + 0(\text{P/F ; 16\%; 10}) - \{457360,02(\text{P/A ; 16\%; 10}) + 573935,26\}$$

$$\text{VAN} = 580000(4,8332) + 0(0,2267) - \{457360,02(4,8332) + 573935,26\}$$

$$\text{VAN} = \$ 18808,29$$

- i= 18%; n= 10

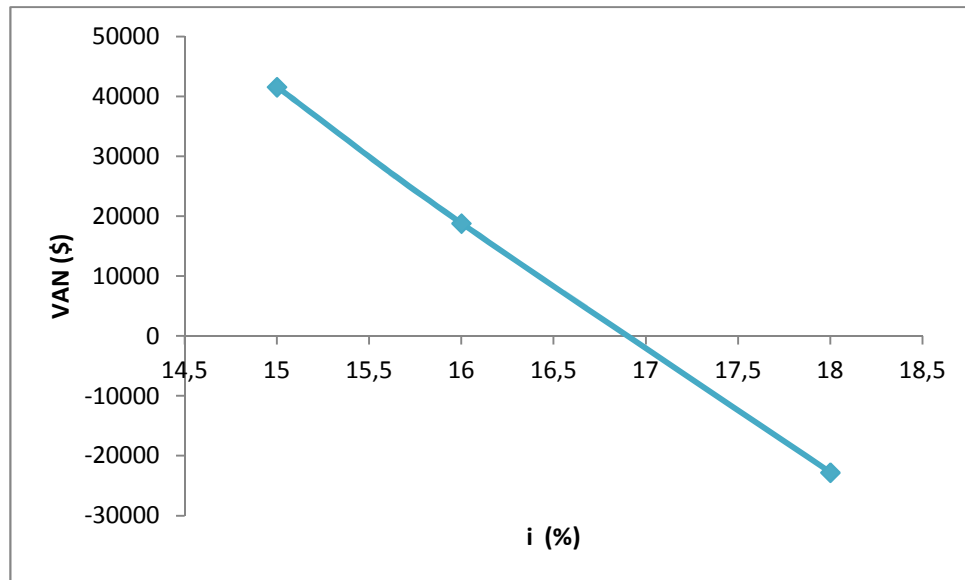
$$\text{VAN} = 580000(\text{P/A ; 18\%; 10}) + 0(\text{P/F ; 18\%; 10}) - \{457360,02(\text{P/A ; 18\%; 10}) + 573935,26\}$$

$$VAN = 580000(4,8332) + 0(0,2267) - \{457360,02(4,8332) + 573935,26\}$$

$$VAN = \$ - 22778,92$$

Los valores calculados se pueden representar en la figura 49.

Figura 49. Interés (%) vs. VAN (\$)



Fuente: Autor

5.8.2 Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR). La tasa interna de retorno es la tasa de interés por medio del cual se recupera la inversión, dicho valor está en función del valor actual neto (VAN).

Para obtener el porcentaje de recuperación de la inversión se debe igualar a cero la tasa interna de retorno, y debemos interpolar entre el valor positivo y negativo del valor actual neto, con los valores de la tabla 58 se obtiene:

Tabla 58. Valores para la interpolación

| i % | VAN |
|-----|-----------|
| 16 | 18808,29 |
| 0 | x |
| 18 | -22778,92 |

Fuente: Autor

Con los valores de la tabla 58, obtenemos el TIR con la siguiente ecuación:

$$x = \%_{VAN^-} (VAN^+) - \%_{VAN^+} (VAN^-) / VAN^+ - VAN^- \quad (50)$$

$$x = 18(18808,29) - 16(-22778,92) / 18808,29 - (-22778,92)$$

$$x = 16,90 \%$$

Por lo tanto obtenemos el valor TIR

$$TIR = 16,90 \%$$

5.9 Análisis beneficio/costo

El análisis beneficio-costo es una herramienta financiera que mide la relación entre los costos y los beneficios asociados a un proyecto de inversión con el fin de evaluar su rentabilidad. [74]

Para obtener la relación beneficio-costo utilizamos la ecuación 51.

$$B/C = \text{beneficio positivos} - \text{beneficio negativos} / \text{costos} \quad (51)$$

Con los datos obtenidos anteriormente podemos clasificar los valores como beneficios y costos, sabiendo que la tasa de retorno es del 17%, obteniendo así:

Beneficios positivo: \$ 580000,00

Beneficio negativo: \$ 0

Costo M&O: \$ 457360,02

Inversión inicial: \$ 573935,26 (A/P; 17%; 10), donde A/P es el coeficiente para la recuperación de capital.

Reemplazando los valores se tiene:

$$B/C = 580000 - 0 / 457360,02 + 573935,26(A/P; 17%; 10)$$

$$B/C = 580000 - 0 / 457360,02 + 573935,26(0,2147)$$

$$B/C = 0,9989 \approx 1$$

Si $B/C \geq 1 \rightarrow$ Proyecto aceptable

Si $B/C < 1 \rightarrow$ Proyecto rechazado

Como la relación de beneficio-costo es igual a 1, se acepta que el proyecto evaluado es económicamente ventajoso.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se culminó con éxito el diseño y la instalación de los servicios de funcionamiento de la columna de destilación de metanol, desarrollado en la planta de producción de biodiesel, de la empresa La Fabril S.A. en la ciudad de Manta.

Se dimensionó con gran éxito las tuberías de conducción de metanol y se seleccionó un acero inoxidable 304, como material adecuado para la conducción de dicho fluido; cabe recalcar que la decisión de utilizar acero inoxidable fue por parte de la empresa.

El uso de bombas neumáticas es una buena opción para el manejo de productos inflamables como es el caso del metanol, con la adecuada selección de los materiales que componen la bomba, podemos garantizar la seguridad y la durabilidad del equipo.

Se dimensionó las tuberías de conducción de vapor de agua desde la sala de calderos, y mediante el uso de la norma ASME B31.1, se diseñó la tubería por presión, encontrando el espesor óptimo y validándolo con el espesor de la tubería comercial (cédula 40). Además mediante el uso de esta norma se seleccionó el material que cumple las necesidades del sistema, es un acero al carbono A53 grado B.

Se seleccionó los accesorios necesarios para instalar la estación reguladora de presión de vapor, ya que los intercambiadores de calor generalmente trabajan a baja presión (60 psig), se hace indispensable seguir las recomendaciones de las empresas especializadas, obteniendo resultados que cumplen a satisfacción dicho propósito.

Se comprobó mediante el uso de las ecuaciones de la transferencia de calor, que el espesor del aislamiento que sugieren los fabricantes, cumplen las necesidades de operación y de seguridad.

La recuperación del condensado en la industria es de suma importancia, ya que se puede utilizar como vapor de baja presión para calentamiento, y/o, para alimentar los calderos. Debido a esto se logró dimensionar con criterio técnico las tuberías de retorno de condensado y seleccionar las trampas de vapor más adecuadas para el proceso.

Al utilizar el aire comprimido como energía neumática, utilizamos tubería de acero al carbono de cédula 40, por facilidad de obtención en el mercado y al hacer una relación con las tuberías de vapor que soportan 175 psig; podemos garantizar que las tuberías son adecuadas para el trabajo ya que la presión es de 120 psig.

La seguridad de los trabajadores y el bienestar de la planta fue un factor de suma importancia en la ejecución del proyecto, debido a las condiciones del ambiente y a que la planta en ese momento estaba en su pico más alto de producción de biodiesel. Por este motivo se realizaron constantes mediciones de acumulación de gases inflamables y se limitó el área, garantizando así un espacio de trabajo seguro.

La adecuada planificación y el trabajo en equipo, conllevaron a instalar la columna de destilación de metanol de forma exitosa y el menor tiempo posible.

Se comprobó mediante las pruebas hidrostáticas realizadas bajo las normas correspondientes, que los equipos y las instalaciones poseen la hermeticidad necesaria e indispensable para el proceso.

Se realizó un proceso de prueba de los equipos, con el uso de agua desmineralizada comprobando así su adecuado funcionamiento. Luego de esto se alimentó la columna

con el fluido para el cual fue diseñada (metanol), obteniendo una pureza entre el 99,7 % y el 99,9 %.

Al realizar el análisis económico del proyecto, se comprobó la factibilidad de su ejecución. Esto debido a que la relación costo-beneficio tiene un valor de 1, que se lo puede tomar como valor aceptable y considerar un proyecto rentable.

El análisis económico es una herramienta muy útil para evaluar la factibilidad del proyecto, pero los otros parámetros que se utilizaron para su ejecución fueron entre otros; la complicación de obtener la materia prima (metanol) en el mercado, la posibilidad de reciclaje del metanol.

La torre de enfriamiento y el tanque de condensado, son equipos que se recuperaron de otros procesos, por lo cual necesitaron mantenimiento y se volvieron operativos.

6.2 Recomendaciones

Al iniciar el proceso de rectificación de metanol comprobar que los equipos de consumo de vapor estén libres de condensado, esto se puede lograr abriendo las purgas o habilitando el bypass de las trampas de vapor.

Tener en lo posible cerradas las válvulas de ingreso de vapor hacia la estación reguladora, cuando los equipos no estén en uso, así se alargará la vida útil de la reguladora de presión y se evitan pérdidas energéticas.

Instalar medidores de caudal al ingreso de la columna y a la salida del producto destilado para cuantificar el producto.

Controlar y mantener estable la temperatura del agua de la torre de enfriamiento.

Realizar limpiezas periódicas a los filtros de aire comprimido, para garantizar la calidad del aire y evitando que los instrumentos de control sufran algún daño.

Realizar una limpieza de la columna de destilación de metanol por lo menos una vez cada seis meses. Para este proceso se debe dejar que la columna se enfríe completamente, drenar su contenido y llenar de agua completamente, produciéndose un lavado total de los filtros, para vital de la columna.

Controlar la calidad de vapor, y revisar el correcto funcionamiento de las trampas de vapor para evitar que se produzca una sobrecarga de condensados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biod-rev2.pdf>
- [2] <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Biocombustibles/Biodiesel.asp>
- [3] <http://www.galeon.com/densidadaceite/biopalma.pdf>
- [4] <http://www.galeon.com/separacionfrutos/biodieselpalma.pdf>
- [5] <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/biodiesel/produccion-de-biodiesel.html>
- [6] <http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biod-rev2.pdf>
- [7] CARDEÑO, Fernando; RÍOS, Luis; “Producción de Biodiesel de aceite crudo de palma mediante catálisis heterogénea”.
<<http://jaibana.udea.edu.co/grupos/revista/revistas/nro051/51-09.pdf>>
- [8] GUERRERO, José; RODRIGUEZ, Fernando; SERRATO, Luis; “Producción de Biodiesel a partir de aceite de palma crudo”.
< <http://www.galeon.com/densidadaceite/biopalma.pdf>> ,
- [9] LAROSA, Rodolfo J;”Proceso para la producción de BIODIESEL”; Refinación de Glicerina. < <http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biod-rev2.pdf> > ,
- [10] MARTICORENA, Alfredo; MANDAGARÁN, Beatriz; CAMPANELLA, Enrique; “Análisis del Impacto Ambiental de la Recuperación de Metanol en la Producción del Biodiesel usando el Algoritmo de Reducción de Desechos WAR”. <<http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v21n1/art05.pdf>> ,
- [11] WHITMAN DIRECT ACTION, “BIODIESEL, Producción y Aplicaciones”, agosto 2008, <<http://es.scribd.com/doc/91119932/32/Separacion-y-Captura-del-Metanol>> .
- [12] <http://www.biodisol.com/como-hacer-biodiesel-produccion-y-fabricacion-de-biodiesel-casero/el-proceso-de-transesterificacion-que-convierte-aceites-y-grasas-en-biodiesel/>
- [13] http://www.biol.unlp.edu.ar/toxicologia/seminarios/parte_1/metanol.html
- [14] <http://es.wikipedia.org/wiki/Metanol>
- [15] <http://cl.msasafety.com/Detectores-Port%C3%A1tiles/Multigas/Detector-Multigas-Altair%26reg%3B-5/p/000080001600001021>
- [16] <http://es.scribd.com/doc/91119932/32/Separacion-y-Captura-del-Metanol>

- [17] <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v21n1/art05.pdf>
- [18] <http://www.slideshare.net/GRESIQ/vapor-de-agua>
- [19] <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/types-of-steam.html#superheat>
- [20] <http://es.scribd.com/doc/56656624/Tipos-de-Vapor-y-Sus-Aplicaciones>
- [21] <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/principal-applications-for-steam.html>
- [22] [http://es.wikipedia.org/wiki/Caldera_\(m%C3%A1quina\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Caldera_(m%C3%A1quina))
- [23] http://www.spiraxsarco.com/ar/pdfs/training/gcm_04.pdf
- [24] <http://www.spiraxsarco.com/ar/pdfs/training/gcm-03.pdf>
- [25] http://www.spiraxsarco.com/ar/pdfs/training/gcm_11.pdf
- [26] <http://www.unprg.edu.pe/bounprg/blogs/media/blogs/rsamillanri/DMecanico/dise%C3%B1o-tuberias.pdf>
- [27] <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/what-is-a-steam-trap.html>
- [28] WATSON McDaniel; Catálogo de productos. <http://www.watsonmcdaniel.com>
- [29] http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3856/2/tramite_de_vapor_1_1.pdf
- [30] <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/clasificacionbombashidraulicas/clasificaciondelasbombashidraulicas.html>
- [31] <http://www.slideshare.net/RakelAlcoser/bombas-y-tipos-9276866#btnNext>
- [32] <http://html.rincondelvago.com/bombas-y-sus-aplicaciones.html>
- [33] <http://es.scribd.com/doc/69236685/Clasificacion-de-Bombas-Hidraulicas>
- [34] <http://www.buenastareas.com/ensayos/P%C3%A9rdidas-Primarias-y-Secundarias-En-Tuber%C3%ADas/4518626.html>
- [35] <http://nps.elregante.com/>
- [36] <http://es.wikipedia.org/wiki/NPSH>
- [37] http://www.bombaszed.com/_upload/Departamento/1/Es_5Aspiraci%C3%B3n.pdf
- [38] <http://bombascentrifugas.info-tecnica.org/introduccion-a-la-cavitacion-en-bombas-centrifugas/>
- [39] http://es.wikipedia.org/wiki/Flujo_laminar
- [40] http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/NormasMV/Tabla_2-3.asp
- [41] <http://es.wikipedia.org/wiki/Cavitaci%C3%B3n>
- [42] <http://www.tecnicafluidos.es/downloads.asp>
- [43] <http://www.wildenpump.es/CatalogoWilden.pdf>

- [44] http://pdf.directindustry.es/pdf/debem/boxer-bombas-neumaticas-de-doble-membrana/Show/23551-57175-_8.html
- [45] http://es.wikipedia.org/wiki/Bombas_Neum%C3%A1ticas
- [46] http://www.unioviedo.es/Areas/Mecanica.Fluidos/docencia/_asignaturas/instalaciones_fluidos/Seminario-AC.pdf
- [47] <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/2902/1/images/GUIAIRECOMPRIMIDO01.pdf>
- [48] <http://es.scribd.com/doc/48083847/DISTRIBUCION-DE-AIRE-COMPRIMIDO>
- [49] http://www.gates.com.mx/pdf/DISTRIBUCION_DE_AIRE_No1.pdf
- [50] <http://www.chemicalprocessingplant.com/distillation-system.html>
- [51] FENIX; folletos proporcionados
- [52] <http://tarwi.lamolina.edu.pe/~dsa/Formuladecalculo.htm>
- [53] http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/confinado/velocidad_recomendada.html
- [54] http://www.fiberglasscolombia.com/imagenes/notas2/nota_tecnica%2069_aislamienais.pdf
- [55] SPIRAX SARCO; Catálogo de productos; Enero 1994
- [56] <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujodegases/presiondevapor/presiondevapor.html>
- [57] <http://pe.msasafety.com/Detectores-Port%C3%A1tiles/Multigas/Detector-Multigas-Altair-5X/p/000080001600001023>
- [58] http://www.anton-paar.com/Portable-Density-Meter-DMA-35/Density-Meter/60_Corporate_en?product_id=325
- [59] <http://www.leer-mas.com/lallave/news42/info.php>
- [60] HESSE. Aire comprimido, Fuente de energía. Festo AG&Co. 2002
- [61] http://cl.kaeser.com/Online_Services/Toolbox/Pressure_drop/default.asp
- [62] <http://www.armstronginternational.com/files/products/traps/pdf/n101spanish.pdf>
- [63] <http://www.acrodyne.com.au/wp-content/uploads/2008/06/1000l.pdf>
- [64] GOULDS PUMP MANUAL GPM6, pág. 607
- [65] HICKS, Tayler G; Manual de cálculo para las ingenierías; editorial McGraw-Hill; pág. 3.377; 3.428
- [66] CRANE; Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías; Editorial McGraw-Hill; México1990. Pág. A 46.
- [67] <http://www.tkfortinox.com/pdf/inoxidables/austeniticos/304L.pdf>
- [68] <http://www.slideshare.net/admon2/costos-indirectos-12073854>

- [69] <http://www.gerencie.com/vida-util-de-los-activos-fijos.html>
- [70] <http://www.facilcontabilidad.com/metodo-depreciacion-linea-recta-ejemplo/>
- [71] <http://clubensayos.com/Temas-Variados/Valor-De-Salvamento/158169.html>
- [72] <http://www.depreciacion.net/metodos.html>
- [73] <http://www.crecenegocios.com/el-analisis-cost-beneficio/>

BIBLIOGRAFÍA

ASME. Code for Pressure Piping, B31.1. U.S.A. 31 de Octubre 2005.

CARNICER, Enrique. Sistemas Industriales Accionados por aire Comprimido. Madrid
1997.

CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Editorial McGraw-Hill.
México 1990.

HICKS, Tyler. Manual de Cálculos para las Ingenierías. Tomo II. Editorial McGraw-
Hill. Tercera edición. México 1998.

HESSE, Stefan. Aire comprimido fuente de energía. FESTO AG & Co.

HOLMAN, J. P. Transferencia de Calor. Editorial McGraw-Hill. 8^{va} edición. España.

INCROPERA, Frank. Fundamentos de Transferencia de Calor. Editorial Pentice Hall.
4^{ta} edición. México. 1999.

MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y Máquinas Hidráulicas. Ediciones del Castillo
S.A. 2^{da} edición; Madrid. 1982.

TARQUIN, Anthony. BLANK, Leland. Ingeniería Económica. Editorial McGraw-Hill.
Quinta edición. México. 2004

LINKOGRAFÍA

BIODIESEL

<http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/biodiesel/produccion-de-biodiesel.html>

2012-11-20

METANOL

http://www.biol.unlp.edu.ar/toxicologia/seminarios/parte_1/metanol.html

2012-11-25

PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN

<http://www.biodisol.com/como-hacer-biodiesel-produccion-y-fabricacion-de-biodiesel-casero/el-proceso-de-transesterificacion-que-convierte-aceites-y-grasas-en-biodiesel/>

2012-09-15

VAPOR DE AGUA Y SUS APLICACIONES

<http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/principal-applications-for-steam.html>

2012-11-22

GENERALIDADES SOBRE CALDERAS

[http://es.wikipedia.org/wiki/Caldera_\(m%C3%A1quina\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Caldera_(m%C3%A1quina))

2012-11-23

SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR

<http://www.unprg.edu.pe/bounprg/blogs/media/blogs/rsamillanri/DMecanico/diseno-tuberias.pdf>

<http://www.spiraxsarco.com/ar/pdfs/training/gcm-03.pdf>

2012-09-15

TRAMPAS DE VAPOR Y SUS APLICACIONES

www.watsonmcdaniel.com

2012-10-05

CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS

<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/clasificacionbombashidraulicas/clasificaciondelasbombashidraulicas.html>

2012-12-20

PÉRDIDAS EN LAS TUBERÍAS

<http://www.buenastareas.com/ensayos/P%C3%A9rdidas-Primarias-y-Secundarias-En-Tuber%C3%ADas/4518626.html>

2012-10-15

FENÓMENO DE LA CAVITACIÓN

<http://es.wikipedia.org/wiki/Cavitaci%C3%B3n>

2012-12-21

BOMBA NEUMÁTICA WILDEN

<http://www.wildenpump.es/CatalogoWilden.pdf>

2012-10-02

DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO

<http://es.scribd.com/doc/48083847/DISTRIBUCION-DE-AIRE-COMPRIMIDO>

2012-12-10

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO 304L

<http://www.tkfortinox.com/pdf/inoxidables/austeniticos/304L.pdf>

2012-12-15

CAÑUELA DE FIBRA DE VIDRIO

http://www.fiberglasscolombia.com/imagenes/notas2/nota_tecnica%2069_aislamienais.pdf

2012-11-25

GUÍA DE SELECCIÓN TRAMPAS DE VAPOR

<http://www.watsonmcdaniel.com>

2012-10-26

MEDIDOR DE GASES MSA _ ALTAIR 5X

<http://pe.msasafety.com/Detectores-Port%C3%A1tiles/Multigas/Detector-Multigas-Altair-5X/p/000080001600001023>

2012-11-16

MEDIDOR DE DENSIDAD PORTÁTIL DMA-35

http://www.anton-paar.com/Portable-Density-Meter-DMA-35/Density-Meter/60_Corporate_en?product_id=325

2012-12-27

PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN TUBERÍAS DE AIRE COMPRIMIDO

Software en línea

http://cl.kaeser.com/Online_Services/Toolbox/Pressure_drop/default.asp

2012-12-21

ANÁLISIS ECONÓMICO

<http://es.scribd.com/doc/81313905/Evaluacion-Por-Relacion-Costo-Beneficio>

<http://itvh-arz-ingenieria-economica-2012.blogspot.com/2012/02/unidad-4-evaluacion-por-relacion.html>

2013-02-20